
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1234R567 – Elektronické informační a řídicí systémy

Měření parametrů 3f transformátoru

Three phase transformer measurement

Bakalářská práce

Autor: **Josef Petřvalský**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.

V Liberci 19. 5. 2011



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis



PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl velice poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D a konzultantu Ing. Jiřímu Kubínovi, Ph.D za pomoc a podporu při tvorbě, zkoušení, návrhu a realizaci bakalářské práce.



Anotace

Bakalářské práce popisuje návrh programu s uživatelským rozhraním, který provádí automatické nebo poloautomatické měření transformátorů nn do 20 kVA. Umožňuje základních štitkových parametrů použitých pro výkonové omezení a další výpočty, provedení vlastního měření, výpočet a zobrazení výsledků v grafickém uživatelském rozhraní na počítači.

Bakalářská práce se zaměřuje na základní měření jmenovitých hodnot tj. měření naprázdno, měření nakrátko a měření se zátěží. Na základě získaných hodnot jsou vypočteny smluvní parametry: napětí nakrátko, převod, ztráty naprázdno, prvky náhradního obvodu atd. Všechna měření splňují podmínky udávané normou. Tato měření vychází z norem ČSN 60075 a ČSN 3351086, kde jsou jasně specifikována.

Jednotlivá měření jsou prováděna automaticky s minimálním zásahem uživatele. Zajištění potřebných hardwarových zásahů (sepnutí stykače, změna rozsahu, změna zkoušky...) je prováděna programem. Rovněž veškeré parametry měřeného obvodu (napětí, proudy) jsou snímány multifunkční měřicí kartou připojenou k počítači a pomocí programu vyhodnocovány, ukládány a vizuálně prezentovány.

Počítačový program je navržen jako automatický s minimálními potřebami zásahu obsluhy.



Annotation

This work concerns to design and create a program with user environment which carried out automatically transformer test for machines on low voltage up to 20 kVA. Program provides entering the basic design parameters for power limits during measurements, perform tests and presents results in a graphical user interface on the computer.

This thesis focuses on the basic measurement from no-load, short circuit and load test. The voltage of short circuit test, turns ratio, no load losses, values of equivalent circuit etc. are calculated from performed measurements. All measurements must meet the conditions indicated by the standard. This measurement is based on ISO standards ČSN 60075 and 3351086 where are clearly specified.

Individual measurements are carried out automatically with minimal user intervention. Program provides the necessary hardware interference (contactors operation, change of scale, change of the test, etc.). Similarly, all measured parameters (circuit voltage, currents) are sensed by multifunction measuring card connected to the computer. Designed program evaluates, stores and visually presents results. A computer program is designed as an automatic with minimum operator intervention.

Seznam použitých značek a symbolů

B	T	magnetická indukce
$B_{1p0}, B_{2p0}, B_{3p0}$	T	magnetická indukce naprázdno
$B_{1pk}, B_{2pk}, B_{3pk}$	T	magnetická indukce nakrátko
$\cos \varphi$	-	účinník
$\cos \varphi_0$	-	účinník naprázdno
$\cos \varphi_k$	-	účinník nakrátko
f	Hz	frekvence
f_0	Hz	kmitočet naprázdno
f_k	Hz	kmitočet nakrátko
f_n	Hz	jmenovitý kmitočet transformátoru
$H_{1pk}, H_{2pk}, H_{3pk}$	Am^{-1}	intenzita magnetického pole primárních vinutí
H_{xy}	-	prvky H_{ij} -matice
i_1	A	okamžitá hodnota primárního proudu
i_{1k}	$\%$	poměr proudů nakrátko
$i_{1p0}, i_{2p0}, i_{3p0}$	A	okamžitá hodnota primárního proudu naprázdno na jednotlivém vinutí
$i_{1pk}, i_{2pk}, i_{3pk}$	A	okamžitá hodnota primárního proudu nakrátko na jednotlivém vinutí
$i_{1sk}, i_{2sk}, i_{3sk}$	A	okamžitá hodnota sekundárního proudu naprázdno na jednotlivém vinutí
i_2	A	okamžitá hodnota sekundárního proudu
$i_{2,k}$	A	sekundární proud nakrátko
i_μ	A	magnetizační „tokotvorný“ proud
$i_{\mu 0}$	A	prvotní magnetizační proud
I_1, I_2, I_3	A	efektivní hodnota vstupního proudu
$I_{1p0}, I_{2p0}, I_{3p0}$	A	efektivní hodnota primárního proudu naprázdno v jednotlivých vinutích
$I_{1pk}, I_{2pk}, I_{3pk}$	A	efektivní hodnota primárního proudu nakrátko v jednotlivých vinutích



$I_{1sk}, I_{2sk}, I_{3sk}$	A	efektivní hodnota primárního proudu nakrátko v jednotlivých vinutích
I_{p0}	A	efektivní hodnota primárního proudu naprázdno
I'_{p0}	A	efektivní hodnota primárního proudu – naprázdno při korekci
I_{pk}	A	efektivní hodnota primárního proudu nakrátko
I_{sk}	A	efektivní hodnota sekundárního proudu nakrátko
I_{Fe}	A	magnetizační proud
I_n	A	jmenovitý proud
k	-	konstanta
k	-	koeficient vazby mezi vinutími
K	-	koeficient teplotního převodu
$K_{u,21,0}$	-	napěťový přenos naprázdno
$K_{u,12,0}$	-	napěťový přenos naprázdno
$K_{i,21,k}$	-	proudový přenos nakrátko
$K_{i,12,k}$	-	proudový přenos nakrátko
l	m	střední délka siločáry
L	H	indukčnost
L_1	H	indukčnost primárního vinutí
L_2	H	indukčnost sekundárního vinutí
$L_{VST,k}$	H	vstupní indukčnost
M	H	vzájemná indukčnost
M_1	H	indukčnost na vstupu
M_2	H	indukčnost na výstupu
N	zav.	počet závitů vinutí
N_1	zav.	počet závitů na primárním vinutí
N_2	zav.	počet závitů na sekundárním vinutí
N_3	zav.	počet závitů na terciárním vinutí
p_1	-	poměrové ztráty hysterezí

p_2	-	poměrové ztráty vířivými proudy
P	W	činný výkon
P_{ak}	W	Rozdíl ztrát způsobené oteplením
$P_{a\theta}$	W	přídavné kompenzační ztráty
P_0	W	činný výkon naprázdno
P_0'	W	činný výkon naprázdno po korekci
$P_{1p0}, P_{2p0}, P_{3p0}$	W	primární činný výkon naprázdno na primárních vinutích
P_k	W	činný výkon nakrátko
P_k'	W	činný výkon nakrátko po korekci
$P_{1pk}, P_{2pk}, P_{3pk}$	W	činný výkon nakrátko na primárních vinutích
$P_{k\theta}$	W	přepočet ztrát nakrátko
Q	Var	jalový výkon
Q_0	Var	jalový výkon naprázdno
Q_k	Var	jalový výkon nakrátko
R_{Z1}, R_{Z2}, R_{Z3}	Ω	odpor zátěže
R_{Cu}	Ω	odpor vinutí nakrátko
R_{Zkrat}	Ω	odpor zkratovacího vodiče
S	m^2	průřez jádra transformátoru
S_0	VA	zdánlivý výkon transformátoru naprázdno
S_k	VA	zdánlivý výkon transformátoru nakrátko
S_n	VA	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
T	s	perioda vzorkovaného signálu
u_1	V	okamžitá hodnota primárního napětí
u_{1k}	%	poměr napětí nakrátko
$u_{1p0}, u_{2p0}, u_{3p0}$	V	okamžitá hodnota primární napětí naprázdno na jednotlivém vinutí
$u_{1s0}, u_{2s0}, u_{3s0}$	V	okamžitá hodnota sekundárního napětí naprázdno na jednotlivém vinutí
u_2	V	okamžitá hodnota sekundárního napětí
u_2'	-	derivace napětí



u_{s0}	V	sekundární napětí naprázdno
u_{ef}	V	efektivní hodnota napětí
u_i	V	indukované napětí
u_{i1}	V	indukované napětí na zdroji na primární straně
u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}	V	indukované napětí primárních vinutí
u_{i2}	V	napětí na zdroji na primární straně
$u_{1sk}, u_{2sk}, u_{3sk}$	V	okamžitá hodnota sekundárního napětí nakrátko na jednotlivém vinutí
$u_{k\vartheta}$	V	činná složka napětí nakrátko
u_{L1}	V	napětí na primárním vinutí
u_{L2}	V	napětí na sekundárním vinutí
u_m	V	elektromotorické napětí
$u_{r\vartheta}$	V	činná složka napětí nakrátko při teplotě ϑ
$u_{x\vartheta}$	V	induktivní složka napětí nakrátko při teplotě
u_r	V	činná složka napětí nakrátko při kmitočtu f_k
u_x	V	induktivní složka napětí nakrátko při kmitočtu f_k
U_1	V	efektivní hodnota napětí primárního vinutí
$U_{1p0}, U_{2p0}, U_{3p0}$	V	efektivní hodnota primárního napětí na jednotlivém vinutí naprázdno
$U_{1s0}, U_{2s0}, U_{3s0}$	V	efektivní hodnota sekundárního napětí na jednotlivém vinutí naprázdno
U_2	V	efektivní hodnota napětí sekundárního vinutí
U_n	V	jmenovité napětí
U_n'	V	jmenovité napětí po korekci
U_{p0}	V	efektivní hodnota primárního napětí naprázdno
U_{pk}	V	efektivní hodnota primárního napětí nakrátko
U_{s0}	V	efektivní hodnota sekundárního napětí naprázdno

U_{sk}	V	efektivní hodnota sekundárního napětí nakrátko
X_{1p0}	Ω	sekundární reaktance nakrátko
X_k	Ω	reaktance nakrátko
Y	S	obecná admitance
$Y_{12,0}$	S	přenosová admitance naprázdno
$Y_{21,0}$	S	přenosová admitance naprázdno
$Y_{VST,0}$	S	vstupní admitance při výstupu naprázdno
$Y_{VST,K}$	S	vstupní admitance při výstupu nakrátko
$Y_{VYST,0}$	S	výstupní admitance při vstupu naprázdno
$Y_{VYST,K}$	S	výstupní admitance při vstupu nakrátko
Z	Ω	obecná impedance
Z_k	Ω	impedance nakrátko
Z_{sk}	Ω	sekundární impedance nakrátko
$Z_{12,K}$	Ω	přenosová impedance naprázdno
$Z_{21,0}$	Ω	přenosová impedance naprázdno
$Z_{VST,0}$	Ω	vstupní impedance při výstupu naprázdno
$Z_{VST,K}$	Ω	vstupní impedance při výstupu nakrátko
$Z_{VYST,0}$	Ω	výstupní impedance při vstupu naprázdno
$Z_{VYST,K}$	Ω	výstupní impedance při vstupu nakrátko
Z_{xy}	-	prvky Z_{ij} -matice
$\delta_{iHTM200M}$	A	chyba proudových sond primárního vinutí
$\delta_{iHTM100s}$	A	chyba proudových sond sekundárního vinutí
δ_i	A	chyba metody měření proudu
∂x_i	-	parametr parciální derivace
∂f	-	derivovaná funkce
ΔP_{Fe}	W	ztráty v magnetickém obvodu
ΔP_{j0}	W	ztráty ve vinutí
Δu_1	V	úbytek napětí na primární indukčnosti
Δu_2	V	úbytek napětí na výstupní indukčnosti
δU_{ef}	V	chyba efektivního napětí
Δy	jednotka	obecná chyba nepřímého měření



Δx_i	jednotka	chyba nepřímé veličiny
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	teplota vinutí
φ	$^{\circ}$	fázový posun
φ_0	$^{\circ}$	fázový posun naprázdno
φ_k	$^{\circ}$	fázový posun nakrátko
Φ	Wb	magnetický indukční tok
$\Phi_{1p0}, \Phi_{2p0}, \Phi_{3p0}$	Wb	magnetický indukční tok primárních vinutí
Φ_0	Wb	zbytkový magnetický indukční tok
$\chi_{\sigma 1}$	Ω	primární rozptylová reaktance
$\chi_{\sigma 2}$	Ω	sekundární rozptylová reaktance
θ	$^{\circ}\text{C}$	referenční teplota pro měření nakrátko



Obsah

PROHLÁŠENÍ	2
ANOTACE	4
ANNOTATION	5
SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	6
<u>1 ÚVOD</u>	<u>14</u>
<u>2 TRANSFORMÁTOR</u>	<u>16</u>
2.1 IDEÁLNÍ TRANSFORMÁTOR, ROZBOR JAKO PASIVNÍ ČTYŘPÓL	16
2.2 ZÁKLADNÍ MODEL TRANSFORMÁTORU VE TVARU IMPEDANČNÍ Z-MATICE	19
2.3 MODEL TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ VE TVARU HYBRIDNÍ HU-MATICE	19
2.4 MODEL TRANSFORMÁTORU PROUDU VE TVARU HYBRIDNÍ H_I-MATICE	21
<u>3 ZKOUŠKY</u>	<u>23</u>
3.1 NORMY	23
3.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO	24
3.2.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ	24
3.2.2 POUŽITÉ VÝPOČTY	25
3.2.3 KOREKCE	30
3.3 ZKOUŠKA NAKRÁTKO	32
3.3.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ	32
3.3.2 POUŽITÉ VZORCE	33
3.3.3 KOREKCE	35
3.4 ZKOUŠKA ZATĚŽOVACÍ	38
3.4.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ	38
3.5 VZORCE PRO PARAMETRY TRANSFORMÁTORU	39
3.6 NEJISTOTY MĚŘENÍ	40
3.6.1 MĚŘÍCÍ KARTA	40
3.6.2 PROUDOVÉ SONDY	41
3.6.3 VÝPOČET NEJISTOT	41



4	<u>HARDWARE</u>	43
<hr/>		
4.1	ROZHRANÍ A KOMUNIKACE	43
4.2	MĚŘÍCÍ KARTA NIDAQ	43
4.3	BLOKOVÉ SCHÉMA, USPOŘÁDÁNÍ	45
5	<u>SOFTWARE</u>	48
<hr/>		
5.1	MATLAB	48
5.2	GUIDE	49
5.3	PROGRAMOVÁ VÝBAVA	51
6	<u>OBSLUHA PRACOVISTĚ</u>	55
<hr/>		
6.1	KONTROLA ZAŘÍZENÍ	55
6.2	VLASTNÍ MĚŘENÍ	56
6.2.1	STRUKTURA MĚŘÍCÍHO ROZHRANÍ	56
6.3	ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ	58
6.4	MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	58
6.5	MĚŘENÍ NAKRÁTKO	62
7	<u>ZÁVĚR</u>	66
<hr/>		
SEZNAM OBRÁZKŮ		67
SEZNAM TABULEK		68
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		69

1 ÚVOD

Transformátory a transformátorky patří k elektronice k nejužívanějším strojům vůbec. Využitím těchto elektromagnetických netočivých strojů je velice široké přes rozsahy výkonových parametrů či jejich funkce (oddělovací, snižující, zvyšující, regulační, bezpečnostní, signálové...). Nalezneme je jak v obvodech malého napětí, tak ve vysokonapěťových aplikacích. Nepostradatelnou úlohu mají především v distribuci elektrické energie.

Ekonomické tlaky zvyšují neustále nároky na transformátory a to nejen na jejich pořizovací, ale také na provozní náklady. Vývoj nových materiálů, technologií a sofistikovanějších konstrukčních a optimalizačních postupů, podstatně zlepšily parametry transformátorů v posledních dekádách.

Měření na transformátorech tvoří v elektrotechnice vlastní disciplínu, která se zaměřuje na všechny typy transformátorů podle velikosti a výkonových parametrů, dále pak podle konstrukce, počtu fází atd. Pro správnou funkci transformátoru je nutné dodržovat příslušné výrobní postupy a kontrolovat jejich výkonové parametry pomocí kontrolních měření – zkoušek. Tato měření jsou přesně definována normami, které předepisují druhy a postupy měření pro tyto transformátory.

Měření na transformátoru znamená několik po sobě jdoucích samostatných měření. Jednotlivá měření se liší dle způsobu zapojení, velikostí a typu měřených veličin (tj. proudu, napětí, oteplení, izolačních vlastností...). Komplexnost těchto měření je značná, a proto je zde namístě vytvoření automatizovaného měření.

Komerční automatizovaná pracoviště nebo speciální testery transformátorů jsou samozřejmě dostupné na trhu. Například testery transformátorů a vinutých dílů do spínaných zdrojů [12], které jsou specializovány na měření při vyšších frekvencích. Měření probíhají při poměrně malém výkonu. Dalšími dostupnými přístroji jsou jednoduché provozní měřiče impedance [13], které poskytují jen elementární informaci o stavu transformátoru a jeho propojení. K dispozici jsou i komplexní měřicí pracoviště [14]. Mezi nejrozšířenější měřicí systémy v revizích a vysokonapěťových aplikacích se užívají DTR (Digital Transformer Ratiometr), které zjišťují vlastnosti vinutí a izolace, výkon a některé dovedou spočítat saturační napětí. Obecně DTR patří k nejpřesnějším. Mezi nízkonapěťové

měřiče zahrnujeme převážně ruční přístroje: testery izolačních odporů transformátorů, testery převodového poměru transformátoru, aj. [15].

Cílem této práce je návrh a realizace automatizovaného testovacího pracoviště transformátorků obsahujícího nezbytný hardware pro výkonové propojení transformátoru nn (do 20 kVA) a měření elektrických veličin. Hardwarovou část jsem vytvořil v loňském roce v rámci předmětu Projekt. Pracoviště je navrženo pro základní zkoušky: naprázdno, nakrátko a při zatížení. Přepět'ové, oteplovací a další speciální zkoušky nejsou součástí řešení. Cílem práce je vylepšit ovládací programem s uživatelským rozhraním, hlavně doplnit kontroly a korekce vyžadované normami. Záměrem je co nejvíce zautomatizovat měření, např. s použitím programovatelného napájecího zdroje je možné měření provést plně automaticky bez zásahu obsluhy. Změřené údaje a výsledky budou přehledně archivovány.

Práce je rozdělena na tři základní celky: První část se zaměřuje na seznámení s problematikou kusových zkoušek transformátorů (zkoušky naprázdno, nakrátko a se zátěží). Druhá část popisuje návrh programu a jeho strukturu. Následuje popis obsluhy pracoviště a výsledky z ověřovacího měření.

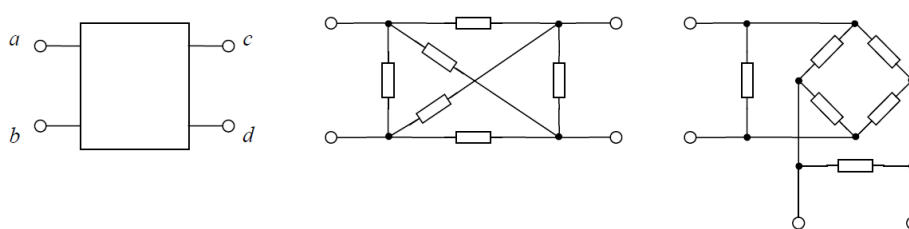
2 Transformátor

[1] Dle normy ČSN 345125 je transformátor definován jako netočivý elektromagnetický stroj, převádějící bez pohybu elektromagnetickou indukcí střídavé nebo přerušované proudy, přiváděné do jedné obvodu ve střídavé proudy nebo proudové impulsy odebírané z druhých obvodů. Tento přenos elektrické energie transformátorem je možný v obou směrech, ze zásady je transformátor používán v jednom směru energie. Z tohoto hlediska lze rozdělit transformátory:

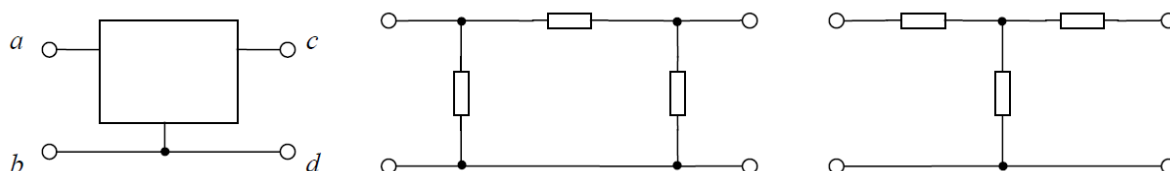
- a) zvyšovací
- b) snižovací
- c) s přenosem energie v obou směrech.

2.1 Ideální transformátor, rozbor jako pasivní čtyřpól

Pasivní čtyřpól v obecném tvaru má šest stupňů volnosti. To znamená, že jakkoliv složitý čtyřpól lze nahradit ekvivalentním čtyřpólem složeným šesti impedancí. Každá dvojice svorek ekvivalentního čtyřpólu je propojena jednou impedancí – šest impedancí a šest stupňů volnosti.



Obr. 1: Náhrada čtyřpólu šesti impedancemi (můstkový článek je ekvivalentní s křížovým článkem)

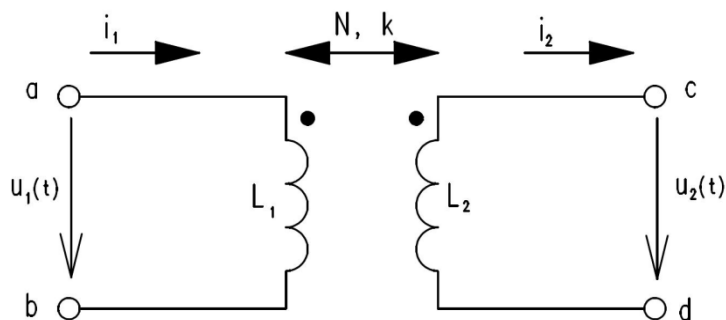


Obr. 2: Náhrada trojpólu Π -článkem obsahující tři impedance. Π -článek lze transfigurací *trojúhelník - hvězda* přetransformovat na T -článek.článkem)

[2] Ze tří stupňů volnosti přímo plyne, že vlastnosti čtyřpólu jsou plně definovány buď trojicí nezávislých přenosových parametrů (např. $Z_{vst,0}$, $Z_{vst,K}$, $K_{U,21,0}$), nebo trojicí nezávislých obvodových parametrů. U transformátoru se obvykle jedná o trojici obvodových parametrů L_1 , L_2 , M nebo L_1 , L_2 , k , protože čtveřice L_1 , L_2 , M , k je na sobě závislá podle známého vztahu

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (1)$$

a proto je libovolný jeden ze čtyř parametrů nadbytečný.



Obr. 3: Transformátor jako dvojbran

Každý přenosový čtyřpól lze popsat maticí o dimenzi 2x2. Kromě toho známé **Z**-matice a **Y**-matice neexistují teoreticky další čtyři hybridní **H**-matice:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}: \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, & \mathbf{H}_k: \begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{k11} & h_{k12} \\ h_{k21} & h_{k22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_2 \\ i_2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}_i: \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{i11} & h_{i12} \\ h_{i21} & h_{i22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, & \mathbf{H}_U: \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{U11} & h_{U12} \\ h_{U21} & h_{U22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}_N: \begin{bmatrix} u_2 \\ i_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{N11} & h_{N12} \\ h_{N21} & h_{N22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix}, & \mathbf{Y}: \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(2, 3, 4, 5, 6, 7)

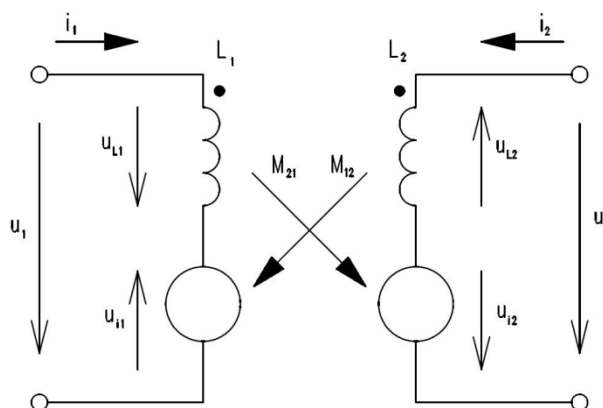
Kde nejdůležitější matice jsou **H_U** a **H_i**, jelikož nám **H_U**-matice pro transformátor napětí a **H_i**-matice pro transformátor proudu. **H_k**- a **H_N**-matice jsou nezajímavé pro

zaměření této práce (\mathbf{H}_k -matice pro kaskádní řazení transformátorů za sebou a \mathbf{H}_N -matice není realizovatelná).

Tab. 1: Přehled přenosových parametrů čtyřpólů

Přenosový parametr	Značka	Vztah k maticovým parametrům z, y, h					
		z	h_K	h_I	h_U	h_N	y
vstupní impedance při výstupu naprázdno	$Z_{vst,0}$	z_{11}					
vstupní impedance při výstupu nakrátko	$Z_{vst,K}$			h_{I11}			
výstupní impedance při vstupu naprázdno	$Z_{výst,0}$	z_{22}					
výstupní impedance při vstupu nakrátko	$Z_{výst,K}$				h_{U22}		
přenosová impedance naprázdno (\rightarrow)	$Z_{21,0}$	z_{21}	$1/h_{K21}$				
přenosová impedance naprázdno (\leftarrow)	$Z_{12,0}$	z_{12}				$1/h_{N21}$	
vstupní admitance při výstupu naprázdno	$Y_{vst,0}$				h_{U11}		
vstupní admitance při výstupu nakrátko	$Y_{vst,K}$						y_{11}
výstupní admitance při vstupu naprázdno	$Y_{výst,0}$			h_{I22}			
výstupní admitance při vstupu nakrátko	$Y_{výst,K}$						y_{22}
přenosová admitance nakrátko (\rightarrow)	$Y_{21,0}$		$1/h_{K12}$				y_{21}
přenosová admitance nakrátko (\leftarrow)	$Y_{12,0}$					$1/h_{N12}$	y_{12}
napěťový přenos naprázdno (\rightarrow)	$K_{U,21,0}$		$1/h_{K11}$		h_{U21}		
napěťový přenos naprázdno (\leftarrow)	$K_{U,12,0}$			h_{I12}		$1/h_{N11}$	
proudový přenos nakrátko (\rightarrow)	$K_{I,21,K}$		$1/h_{K22}$	h_{I21}			
proudový přenos nakrátko (\leftarrow)	$K_{I,12,K}$				h_{U12}	$1/h_{N22}$	

2.2 Základní model transformátoru ve tvaru impedanční Z -matice



Obr. 4: Základní obvodový model transformátoru

Pro okamžité hodnoty lze Z -matici psát ve tvaru:

$$u_i(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - u_{i1}(t), \quad (8) \quad \text{nebo-li: } u_i(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M_i \frac{di_2(t)}{dt} \quad (9)$$

$$u_2(t) = u_{i2}(t) - L_2 \frac{di_2(t)}{dt}, \quad (10) \quad u_i(t) = L_i \frac{di_1(t)}{dt} - M_i \frac{di_2(t)}{dt} \quad (11)$$

2.3 Model transformátoru napětí ve tvaru hybridní H_U -matice

Tímto modelem, s ohledem na technické využití transformátoru, je nejdůležitější pro chápání transformátoru jako „zdroj“ napětí viz obr. 4. Základní soustavu rovnic (10, 11), odpovídající Z -matici (1), je nutno upravit do tvaru H_U matice (4). Matematický model transformátoru napětí pak získá tvar:

$$i_1(t) = i_{\mu 0} + \frac{1}{L_i} \int_0^T u_1(t) dt + k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} i_2(t) \quad (12) \quad \text{nebo-li} \quad i_1(t) = i_{\mu 0}(t) + i'_2(t) \quad (13)$$

$$u_2(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} u_1(t) - L_2(1 - k^2) \frac{di_2(t)}{dt} \quad (14) \quad u_2(t) = u_{2,0}(t) - \Delta u_2(t) \quad (15)$$

2.4 Model transformátoru proudu ve tvaru hybridní **Hi**-matice

Tento model představuje chování transformátoru jako „zdroj“ proudu s indukčností viz. obr. 4.

Ze **Z**-matice (2) je nutno přetvořit na **Hi**-matici (4):

$$u_1(t) = L_1(1 - k^2) \frac{di_1(t)}{dt} + k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} u_2(t) \quad (23)$$

neboli

$$u_1(t) = \Delta u_1(t) + u'_2(t) \quad (24)$$

$$i_2(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} i_1(t) - \left(I_{\mu 0} + \frac{1}{L_2} \int_0^T u_2(t) dt \right) \quad (25)$$

neboli

$$i_2(t) = i_{2,K}(t) - i_\mu(t) \quad (26)$$

kde převod transformátoru neboli proudový přenos nakrátko (\rightarrow) a napět'ový přenos naprázdno (\leftarrow), s ohledem na rovnici (22), bude:

$$K_{I,21,0} = K_{U,12,K} = \frac{M}{L_2} = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (27)$$

Všimněme si, že **Hi**-matice (24) je symetrická podle hlavní diagonály. Význam veličin v rovnicích (24), (26) matematického modelu je následující:

$$i_\mu(t) = I_{\mu 0} + \frac{1}{L_2} \int_0^t u_2(t) dt \quad (28) \quad \text{magnetizační „tokotvorný“ sekundární proud,}$$

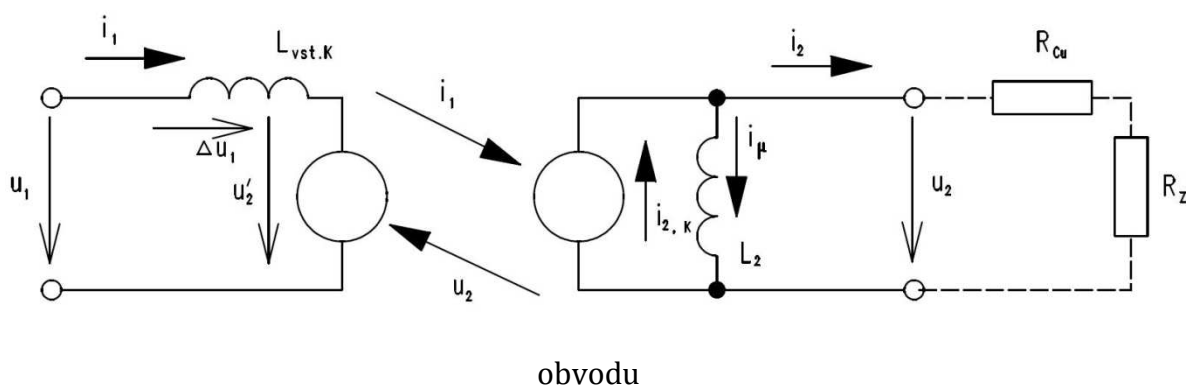
$$i_{2,K} = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} i_1(t) \quad (29) \quad \text{sekundární proud nakrátko, přepočtený pomocí primárního proudu,}$$

$$i_2(t) = i_{2,K}(t) - i_\mu(t) \quad (30) \quad \text{výstupný měřený proud, zatížený principiální neodstranitelnou chybou o velikosti } [-i_\mu(t)]$$

$$u_2'(t) = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} u_2(t) \quad (31) \quad \text{primární napětí přepočítané ze sekundáru na primár, vnucené do měřeného primárního obvodu}$$

$$L_{vst,K} = L_{1,K} = (1 - k^2)L_1 \quad (32) \quad \text{vstupní indukčnost transformátoru, vnesená do měřeného primárního obvodu}$$

$$\Delta u_1(t) = (1 - k^2)L_1 \frac{di_1(t)}{dt} \quad (33) \quad \text{úbytek na vstupní indukčnosti, vnesený do měřeného primárního}$$



Obr. 6: Obvodový model transformátoru proudu

3 Zkoušky

Transformátory a transformátorky podléhají normám ČSN EN 60076, *Výkonové transformátory, část 1: Všeobecné*, kde jsou popsány zvyklosti a zásady značení, výpočty, druhy zkoušek, apod.. a ČSN 35 1085, *Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem*.

3.1 Normy

Norma ČSN EN 60076 vydána roku 1997, zaměřená pro klasické transformátorky a transformátory běžné.

Rozsah platnosti:

- Jmenovité transformátory se jmenovitým výkonem menším než 1 kVA a trojfázové s menším než 5 kVA
- Přístrojové transformátory, zkušební transformátory, svařovací transformátory

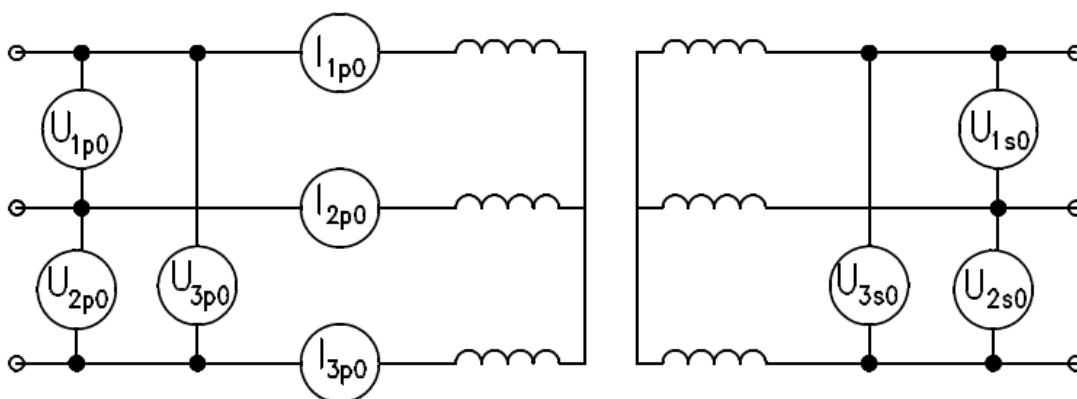
Norma ČSN 35 1086 byla vydána v roce 1978, pro výkonové transformátory (distribuční), rozsah platnost:

- Výkonové stacionární transformátory pro všeobec. použití včetně autotransformátorů, transformátorů pro vlastní spotřebu elektráren a pro kompletní transformační stanice trojfázové o výkonu 5 kVA a více a jednofázové o výkonu větším jak 1 kVA

3.2 Zkouška naprázdno

Zkouška naprázdno se provádí za účelem zisku dat o magnetickém obvodu transformátoru. Především určení ztrát naprázdno.

3.2.1 Podmínky měření



Obr. 7: Schéma zapojení naprázdno

Všeobecné podmínky: Při chodu transformátoru naprázdno napájíme vstupní vinutí střídavým napětím $U_{1p0,2p0,3p0}$ s jmenovitou frekvencí f_n , při čemž výstupní vinutí je rozpojeno. Pro průběh primárních napětí $U_{1p0,2p0,3p0}$ musí platit podmínka praktické sinusovky. Praktická sinusovka je pojem určující meze, kdy křivka se dá považovat za sinusovku. V našem případě musí být splnění maximálně 5% zkreslení (každý bod na křivce průběhu primárního napětí musí být max. odlišný o 5% amplitudy od odpovídající amplitudy sinu) a poměr efektivní a střední hodnoty primárního napětí se neliší více jak o 2% z 1,11 (viz. kap. 3.2.3). Na výstupu je při tom napětí $U_{1s0,2s0,3s0}$, které je totožné s vnitřním indukovaným napětím $U_{i1,i2,i3}$, neboť proud na výstupu je nulový.

Pro jednoduchý případ činnosti transformátoru, když sekundární cívka není připojena k zátěži a neodebírá se z ní výkon (chod naprázdno). Sekundární cívkou tedy neprochází proud a do primárního vinutí se zpětně neindukuje žádné napětí. Primární cívka je připojena ke zdroji elektromotorického napětí (v našem případě napětí sítě). Proměnný magnetizační proud I_{mag} v ní vyvolá proměnný magnetický indukční tok Φ , v důsledku něhož se v cívce indukuje elektromotorické napětí u_m .

$$u_m = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (34)$$

Vstupem prochází proud $I_{1p0,2p0,3p0}$, který u normálních technických transformátorů bývá podle velikosti (0,015 až 0,17) I_n , kde I_n je jmenovitý zatěžovací proud. Větší hodnoty $I_{1p0,2p0,3p0}$ platí pro malé transformátory, menší pro velké. Vnitřní napětí U_{il} je o úbytky $R_i \cdot I_{1p0,2p0,3p0}$ na činném odporu a $X_{l\sigma} \cdot I_{10}$ na rozptylové reaktanci vstupního vinutí nižší než přiváděné napětí $U_{1p0,2p0,3p0}$.

Vektor proudu $I_{1p0,2p0,3p0}$ svírá s vektorem vnitřního indukovaného napětí U_{il} úhel $\varphi < \pi/2$. Rozkladem na složky dostaneme jalovou neboli magnetizační složku I_{Fe} ve směru a smyslu U_{il} , odpovídá ztrátám v magnetickém obvodu ΔP_{Fe} . Fázový posun naprázdno φ_{10} , tj. úhel $I_{1p0,2p0,3p0}$ a $U_{1p0,2p0,3p0}$ je menší než $\pi/2$, takže celkový příkon naprázdno pro jednu fázi $P_{10} = U_{1p0} \cdot I_{1p0} \cdot \cos \varphi_{10}$ představuje celkové ztráty naprázdno ΔP_{1p0} , které bývají (0,003 až 0,01) S_n , kde S_n je jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [VA]. Ztráty naprázdno obsahují kromě ztrát v magnetickém obvodu nepatrné ztráty na vinutí $\Delta P_{j0} = R I_{1,2,3}^2$ vstupní strany, ztráty v dielektriku izolace a eventuální ztráty ve stahovací konstrukci způsobené netočivými toky od „třecích vln“ (všechny vyšší harmonické) a magnetické nesouměrnosti. Protože úbytek při proudu naprázdno je velmi malý (0,0015 až 0,0024) U_n , lze ztráty ve vinutí při chodu naprázdno zanedbat, zvláště u velkých transformátorů.

3.2.2 Použité výpočty

Do programu byly zakomponovány následující výpočty:

Efektivní hodnota vstupního napětí U se spočte:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad (35)$$

kde T je doba signálu
 $u(t)$ je okamžitá hodnota primárního napětí v čase t

Máme číselné hodnoty, tudíž nespojitou křivku a proto je nutno integrál nahradit součtem (obdélníková metoda), podmínka pro tento krok spočívá v dodržení velikosti N . N musí obsahovat tolik hodnot, aby bylo k -násobkem periody, kde perioda T obsahuje p -prvků v jedné periodě.

$$N \in k * T * p \quad (36)$$

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2} \quad (37)$$

kde N je počet prvků v k -periodách
 u_n je okamžitá hodnota aktuálního vzorku n

Obdobně se vypočítá efektivní hodnota proudu.

Převod transformátoru nejsnadněji získáme jako podíl primárního a sekundárního napětí

$$p_{1p0} = \frac{U_{1p0}}{U_{1p0}} \quad (38)$$

kde U_{1p0} je efektivní napětí naprázdno vstupní strany
 U_{1s0} je efektivní napětí naprázdno vstupní strany

Impedance naprázdno určíme jako podíl efektivních hodnot primárního napětí U_{1p0} a proudu I_{1p0} .

$$Z_{1p0} = \frac{U_{1p0}}{I_{1p0}} \quad (39)$$

kde I_{1p0} je efektivní proud naprázdno vstupní strany

Pro výpočet činného výkonu na jedné fázi P_{1p0} se integrál nahradí ekvivalentem pro nespojitý signál sumou. Pro dodržení správného výpočtu sumy je nutno splnit podmínku kdy N musí být takové, aby splňovalo podmínku (36).

$$P_{1p0} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{1p0}(t) u_{1p0}(t) dt, P_{1p0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_{1p0n} u_{1p0n} \quad (40, 41)$$

kde i_{1p0} je okamžitá hodnota primárního proudu naprázdno
 u_{1p0} je okamžitá hodnota primárního napětí naprázdno

Zdánlivý výkon naprázdno na jedné fázi S_{1p0} se spočítá z efektivních hodnot napětí a proudu naprázdno v příslušné fázi

$$S_{1p0} = U_{1p0} \cdot I_{1p0} \quad (42)$$

Celkový činný výkon transformátoru naprázdno P_0 je součet jednotlivých činných výkonů na vinutích transformátoru

$$P_0 = P_{1p0} + P_{2p0} + P_{3p0} \quad (43)$$

kde P_{1p0} činný výkon na 1. fázi vynutí naprázdno
 P_{2p0} činný výkon na 2. fázi vinutí naprázdno
 P_{3p0} činný výkon na 3. fázi vinutí naprázdno

Obdobně se zjišťuje celkový zdánlivý výkon transformátoru.

Jalový výkon naprázdno

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2} \quad (44)$$

Účinník nezjišťujeme z vzájemného zpoždění proudu na napětí, jelikož tato metoda nese s sebou velkou chybu. Výpočet realizujeme přes poměr činného výkonu P a

zdánlivého výkonu S , tato metoda je zatížena mnohem menší chybou než metodou přes průchody nulou.

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{p0}}{S_{p0}} \quad (45)$$

Jednoduchým přepočtem získáme úhel posunutí mezi proudem a napětím primární strany transformátoru.

$$\varphi_0 = \arccos(\cos \varphi_0) \quad (46)$$

Z impedance naprázdno se zjistí odpor náhradního schématu představující ztráty v železe R_{Fe} (odpor, který musí být překonán pro natočení magnetických domén – magnetizaci jádra transformátoru).

$$R_{Fe} = Z_{p0} \cdot \cos \varphi_{10} = \frac{U_{p0}}{I_{p0} \cdot \cos \varphi_0} \quad (47)$$

Hlavní reaktance náhradního obvodu naprázdno charakterizuje reaktance X_{10}

$$X_{p0} = \frac{U_{p0}}{I_{p0} \cdot \sin \varphi_0} \quad (48)$$

Hlavní Indukčnost primárního vinutí naprázdno

$$L_{p0} = \frac{X_{p0}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (49)$$

kde X_{p0} hlavní reaktance naprázdno
 f frekvence napájení

Indukční tok primárního vinutí Φ_{1p0} a počáteční stav Φ_0

$$\Phi_{1p0}(t) = \int_0^T u_{1p0}(t) dt + \Phi_0(0) \quad (50)$$

$$\Phi_0(0) = \frac{\sup(\int_0^T u_{1p0}(t) dt) - \inf(\int_0^T u_{1p0}(t) dt)}{2} \quad (51)$$

kde Φ_0 integrační podmínka, za předpokladu že máme ustálený harmonická signál bez stejnosměrné složky.

Intenzita magnetického pole primární cívky H_{1p0} , za předpokladu homogenního magnetického pole

$$H_{1p0}(t) = \frac{N_1 \cdot i_{1p0}(t)}{l} \quad (52)$$

kde N_1 počet závitů na vstupu primárního vnutí
 l střední délka siločáry

Magnetická indukce jádra transformátoru naprázdno

$$B_{1p0}(t) = \frac{N_1 \cdot \Phi_{1p0}(t)}{S} \quad (53)$$

kde S průřez jádra transformátoru
 Φ_{1p0} intenzita magnetického pole primárního vnutí

3.2.3 Korekce

Při měření transformátorů se mohou vyskytovat určité druhy chyb, rušení či nedostatků způsobené místem měření např. distribuční sítě (napájení ze sítě, nedodržení kmitočtu, napětí...). Proto se provádí přesně dané přepočty, které částečně potlačí nedostatky.

Při měření naprázdno musíme zajistit napájecí napětí takové, aby mělo průběh prakticky sinusový a prakticky souměrné, Pokud tato podmínka není splněna, musí se provést korekce.

➤ Korekce na nesinusový tvar napájecího napětí

Napájecí napětí nastavíme tak, aby střední hodnota tohoto napětí byla rovna efektivní hodnotě jmenovitého napětí U_n udaného na štítku transformátoru dělená 1,11. A měříme proud naprázdno I'_{p0} a ztráty naprázdno P'_0 .

$$U'_n = \frac{U_n}{1,11} \quad (54)$$

Poté se nastaví napájecí napětí na hodnotu jmenovitého napětí U_n . A měříme opět proud naprázdno I''_{p0} .

Přepočtem z naměřených hodnot určíme skutečné ztráty naprázdno P_0 a proud naprázdno I_{p0}

$$P_0 = \frac{P'_0}{p_1 + k \cdot p_2} \quad (55)$$

$$I_0 = \frac{I'_{p0} + I''_{p0}}{2} \quad (56)$$

kde	p_1	poměrové ztráty hysterezí
	p_2	poměrové ztráty vířivými proudy
	P'_0	naměřený činný výkon při U'_n
	k	koeficient poměru napětí

$$k = \left(\frac{U_{p0}}{U_n} \right)^2 \quad (57)$$

Pro hodnoty magnetické indukce B v magnetickém obvodu transformátoru se poměrové ztráty p_1 a p_2 určují dle speciálních tabulek (rozdělení dle druhu a použité techniky výroby).

➤ Korekce při kmitočtu odlišného od jmenovitého

Nastane-li situace, kdy kmitočet f_0 napájecího obvodu se liší od jmenovitého kmitočtu f_n , lze provést korekci. Avšak jen do meze $\pm 3\%$ od jmenovité frekvence f_n .

$$U'_n = \frac{U_n}{f_n} \cdot f_0 \quad (58)$$

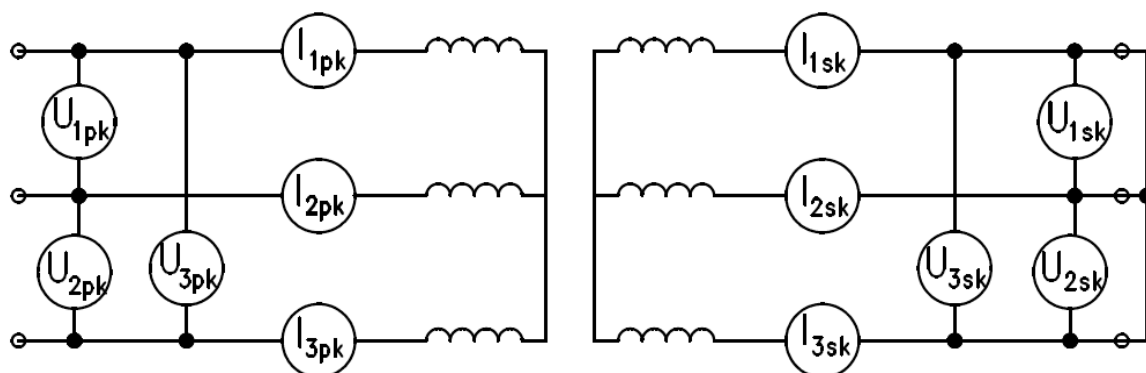
Ztráty naprázdno pro odlišný kmitočet se přepočte následovně

$$P_0 = \frac{P'_0}{p_1 \frac{f_0}{f_n} + k \cdot p_2 \left(\frac{f_0}{f_n} \right)^2} \quad (59)$$

3.3 Zkouška nakrátko

Zkouška nakrátko nám umožňuje určit ztráty „v mědi“. Především disipatibilní ztráty tvořené vlastním odporem ve vinutí, které je proměnné v závislosti na teplotě.

3.3.1 Podmínky měření



Obr. 8: Schéma zapojení nakrátko

Všeobecné podmínky: Při chodu transformátoru nakrátko napájíme vstupní vinutí střídavým napětím $U_{1pk,2pk,3pk}$, $0,5 - 10\%$ jmenovitého napětí U_n s jmenovitým kmitočtem f_n , ze zásady 50 Hz, při čemž výstupní vinutí je spojeno (zkratováno). Na výstupu je při tom napětí $U_{1sk,2sk,3sk} \cong 0$ V, které je totožné s vnitřním indukovaným napětím U_{i2} , neboť proud $I_{1sk,2sk,3sk}$ je roven maximálnímu proudu.

Stav kdy se sekundární napětí rovná nule může nastat za předpokladů, že máme ideální prostředí, ideální transformátor apod.. V praxi pracujeme s neideálními transformátory a neideálním prostředím, proto se snažíme co nejvíce přiblížit ideálnímu stavu transformátoru. Např. U měření nakrátko sekundární strana transformátoru je zkratována, plíškem, drátem. Bohužel i tento nepatrný plíšek, drát, má svůj ohmický odpor a musíme jej zahrnout do výpočtů (70).

Stav nakrátko je pro transformátor náročný, z hlediska vysokých sekundárních proudů způsobené zkratem ($Z \cong 0 \Omega$). Sekundární vinutí je velice namáháno a proto stav nakrátko by měl, pokud možno trvat jen malý okamžik, který je udán normou ČSN [10] či štítkovým údajem.

Pozn. Při proudech vyšších jak 40% jmenovité hodnoty U_n se musí hodnoty odečíst do času t , která je definován v normě.

$$t = \frac{480}{j_1 \cdot j_2} \quad (60)$$

kde j_1 proudová hustota primárního vinutí
 j_2 proudová hustota sekundárního vinutí

3.3.2 Použité vzorce

Procentní napětí nakrátko udává míru velikosti vstupního napětí na zkratovaném transformátoru, jímž protéká jmenovitý proud I_{IN} :

$$u_{1k} = \frac{U_{pk}}{U_n} \cdot 100\% \quad (61)$$

Převrácená hodnota procentního napětí nakrátko udává kolikrát větší je ustálený zkratový proud transformátoru (při napájení jmenovitým napětím) než jmenovitý.

$$i_{1K} = \frac{I_{1n}}{I_{pk}} 100\% \quad (62)$$

Impedance transformátoru nakrátko Z_K

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (63)$$

Zdánlivý, činný a jalový výkon nakrátko

$$S_{1kp} = U_{1kp} \cdot I_{1kp} \quad (64)$$

$$S_k = S_{1kp} + S_{2kp} + S_{3kp} \quad (65)$$

$$P_{1kp} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{1kp}(t) \cdot i_{1kp}(t) dt \quad (66)$$

$$P_k = P_{1kp} + P_{2kp} + P_{3kp} \quad (67)$$

$$Q_k = \sqrt{S_k^2 - P_k^2} \quad (68)$$

Účinník z činného a zdánlivého výkonu

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} \quad (69)$$

Odpor zkratového vodiče na sekundárním vinutí

$$R_{zkrat} = \frac{U_{sk}}{I_{sk}} \quad (70)$$

Kompenzace ztrát ve vinutích, kde zahrnujeme odpor vodiče, kterým zkratujeme sekundární stranu transformátoru

$$R_{Cu} = \frac{U_k}{I_k} - R_{zkrat} \quad (71)$$

Reaktance nakrátko X_K z impedance nakrátko Z_K :

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_{Cu}^2} \quad (72)$$

Indukční tok nakrátko s kompenzací

$$\Phi_{1pk} = \frac{1}{N_1 \Delta t} \sum u_{1pk}(n) - R_{zkrat} i_{1sk}(n) \quad (73)$$

Dále z reaktance, lze dopočítat rozptylovou indukčnost L :

$$L_k = \frac{X_k}{2\pi \cdot f} \quad (74)$$

Intenzita magnetického pole

$$H_{1pk}(t) = \frac{N_1 \cdot i_{1pk}(t) - N_2 i_{1sk}(t)}{l} \quad (75)$$

kde i_{1pk} proud nakrátko na primárním vinutí transformátoru

i_{1sk} proud nakrátko na sekundárním vinutí transformátoru

Magnetická indukce nakrátko

$$B_{1pk}(t) = \frac{N_1 \cdot \Phi_{1pk}(t)}{S} \quad (76)$$

3.3.3 Korekce

Přepočty a korekce pro neideální stav při provádění zkoušky nakrátko. Pro přepočty na referenční teploty, apod.

➤ Ztráty nakrátko a napětí nakrátko

$$P_k = P'_k \cdot \left(\frac{I_n}{I'}\right)^2 \quad (77)$$

$$u_k = \frac{U'_k \cdot I_{n2}}{U_n \cdot I'} \cdot 100 \quad (78)$$

Při měřeních ztrát nakrátko se musí tyto výkony převést na teplotu θ pro teplotní třídy A, B, E na 75 °C, pro F, H, C na 115 °C.

Rozdíl ztrát P_{ak} bereme v případě, že přídatné ztráty způsobené oteplením vinutí, kdy teplota ϑ je vyšší, než provozní teplota. Proto se ztráty převádí na referenční teplotu vinutí podle vztahu:

$$P_{ak} = P_k - \sum I^2 R \quad (79)$$

$$P_{a\theta} = P_{ak} \cdot \frac{1}{K} \quad (80)$$

$$\sum I^2_{1-3pk} R_{\theta} = \sum I^2_{1-3pk} R \cdot K \quad (81)$$

kde R_{θ} odpor vinutí při teplotě ϑ
 K koeficient teplotního převodu
 $P_{a\theta}$ přídatné ztráty

$$K = \frac{\theta + T}{\vartheta + T} \quad (82)$$

kde T teploty pro druh vinutí (měď $T = 235$ °C, hliník = 225 °C)
 θ referenční teplota pro měření nakrátko
 ϑ teplota vinutí

Pro přepočet na ztráty nakrátko se používají tyto empirické vztahy.

$$P_{k\vartheta} = \sum I_{1-3k}^2 R_{\vartheta} + P_{a\vartheta} \quad (83)$$

Tento vztah platí pro podmínku

$$\frac{P_{a\vartheta}}{\sum I^2 R_{\vartheta}} \leq 0,1 \quad (84)$$

Pokud tato ztrátová podmínka není splněna, musí se provést převedení výkonu $P_{k\vartheta}$ na referenční teplotu dle vzorce:

$$P_{k\vartheta} = P_k \cdot K \quad (85)$$

- Napětí nakrátko se také převádí na referenční teplotu vinutí. Napětí nakrátko $u_{k\vartheta}$ odpovídající jmenovité teplotě se přepočte dle vztahu

$$u_{k\vartheta} = \sqrt{(u_{r\vartheta} \cdot K)^2 + u_{x\vartheta}^2} \quad (86)$$

kde $u_{r\vartheta}$. činná složka napětí nakrátko při teplotě ϑ
 $u_{x\vartheta}$. induktivní složka napětí nakrátko při teplotě ϑ
 ϑ teplota vinutí

$$u_{r\vartheta} = \frac{P_k}{100 \cdot P_n} \quad (87)$$

$$u_{x\vartheta} = \sqrt{u_{k\vartheta}^2 - u_{r\vartheta}^2} \quad (88)$$

kde $u_{k\vartheta}$. činná složka napětí nakrátko

Pokud činná složka napětí nakrátko $u_{k\vartheta}$ je menší než 15% hodnoty napětí nakrátko $u_{k\vartheta}$, přepočet se neaplikuje.

➤ Frekvenční podmínky při měření nakrátko

Kmitočet napájecího napětí musí splňovat $\pm 3 \%$ od jmenovité hodnoty kmitočtu f_n udaného na transformátoru.

Napětí nakrátko při jmenovité frekvenci u_{fn} (%) se spočítá z naměřené hodnoty napětí nakrátko a naměřené frekvenci f_k' .

$$u_{fn} = \sqrt{\left(u_x' \cdot \frac{f_n}{f_k'}\right)^2 + u_r'^2} \quad (89)$$

kde u_r . činná složka napětí nakrátko při kmitočtu f_k'
 u_x . induktivní složka napětí nakrátko při kmitočtu f_k'
 f_n jmenovitý kmitočet

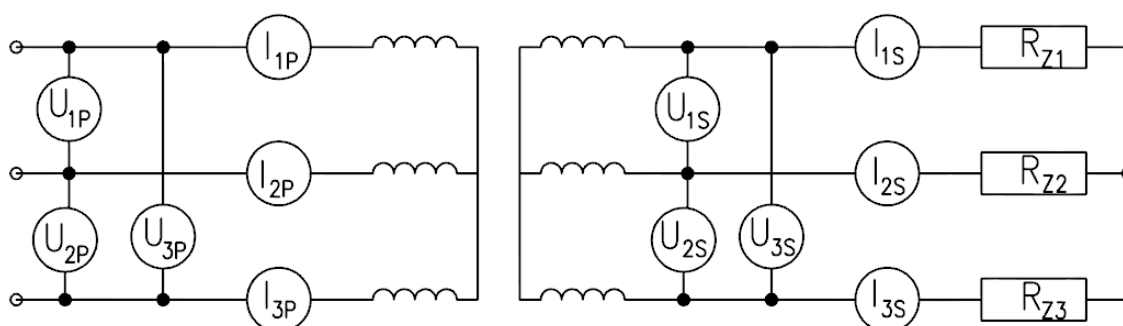
Je-li činná složka napětí nakrátko u_r nepřevyšuje 15% hodnoty napětí nakrátko u_{k0} , je možné převést napětí nakrátko na jmenovitý kmitočet.

$$u_{fn} = u_k \cdot \frac{f_n}{f'} \quad (90)$$

3.4 Zkouška zatěžovací

Při zatěžovací zkoušce zkoumáme především oteplení transformátoru. Transformátor napájíme jmenovitým napětím a proudem.

3.4.1 Podmínky měření



Obr. 9: Schéma zapojení transformátoru se zátěží

Všeobecné podmínky: Při nejběžnějším zapojení transformátoru, zátěž, vstup napájíme střídavým jmenovitým napětím $U_{1P,2P,3P}$ a sledujeme primární proudy, v sekundárním obvodu sledujeme napětí proud a teplotu vinutí ϑ .

3.5 Vzorce pro parametry transformátoru

Pro naši úlohu jsme použily měřicí kartu NIDAQ 6212, která umožňuje zaznamenat hodnotu napětí a proudu se vzorkovací frekvencí f_s , z kterých lze snadno určit vzájemné posunutí (tj. φ), činný a zdánlivý výkon.

Efektivní hodnota vstupního napětí $U_{1,2,3}$ se spočte:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad (91)$$

Máme číselné hodnoty, tudíž nespojitou křivku a proto je nutno integrál nahradit součtem (obdélníková metoda):

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2} \quad (92)$$

Efektivní hodnota vstupního proudu $I_{1,2,3}$ se spočte:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}, \quad I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2} \quad (93, 94)$$

Celkový činný výkon dodávaný do transformátoru, podle předešlých poznatků:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) u(t) dt, \quad P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n u_n \quad (95, 96)$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (97)$$

Účinník nakrátko $\cos \varphi$ obecně v 3f strojích:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (98)$$

3.6 Nejistoty měření

Každé měření obsahuje nejistoty měření, jelikož v praxi ideální součástky, ideální prostředí neexistuje, proto určujeme okolí naměřené veličiny, kde se může nacházet.

3.6.1 Měřicí karta

Chybu napětí udává přesnost napěťových vstupů měřicí karty

Tab. 2: Přehled specifikace karty pro výpočet nejistot pro rozsahy 0,2 – 10 V

Rozsah		Zbytková chyba zisku [ppm z hodnoty]	Vstupní teplotní chyba [ppm/°C]	Referenční teplotní chyba	Zbytková chyba z rozsahu [ppm z rozsahu]	Teplotní kompenzace [ppm z rozsahu/°C]	Chyba diferenciální nonlinearit [ppm z rozsahu]	Náhodné rušení [μVrms]	Absolutní chyba na plném rozsahu [μV]	Citlivost [μV]
Kladný [V]	Záporný [V]									
10	-10	75	7,3	5	20	34	76	295	2710	118,0
5	-5	85	7,3	5	20	36	76	149	1420	59,6
1	-1	95	7,3	5	25	49	76	32	310	12,8
0,2	-0,2	135	7,3	5	40	116	76	13	89	5,2

Absolutní Přesnost =

$$\text{Hodnota. (Vstupní Chyba)} + \text{Hodnota. (Kompenzovaná chyba)} + \text{nejistota Rušením} \quad (99)$$

Vstupní Chyba =

$$\text{Zbytková Vstupní Chyba} + \text{Vstupní Teplotní chyba. (Teplotní Změna z Posledního Vnitřního Zavolání)} + \text{Referenční Teplotní Chyba. (Teplotní Změna z Posledního vnějšího Zavolání)} \quad (100)$$

$$\text{Chyba Offsetu} = \text{Zbytkový Offset} + \text{Teplotní offset}$$

$$+ (\text{Teplotní Změna Posledního Vnějšího Zavolání}) + \text{Chyba Diferenciální Nonlinearity} \quad (101)$$

$$\text{Nejistota Rušením} = \frac{\text{Náhodné Rušení} \cdot 3}{\sqrt{100}} \quad (102)$$

Program využívá převážně rozsah analogových vstupů $\pm 5V$ a v případech přepnutí rozsahů $\pm 2V$ (proudové snímače při měření nakrátko)-.

Příklad výpočtu nejistoty měření na rozsahu $\pm 10V$:

$$\text{Vstupní Chyba} = 75 \text{ ppm} + 7,3 \text{ ppm} \cdot 1 + 5 \text{ ppm} \cdot 10$$

$$\text{Kompenzovaná Chyba} = 20 \text{ ppm} + 34 \text{ ppm} \cdot 1 + 76 \text{ ppm}$$

$$\text{Nejistota Rušením} = \frac{295 \mu V \cdot 3}{\sqrt{100}}$$

$$\text{Vstupní Chyba} = 132,3 \text{ ppm}$$

$$\text{Kompenzovaná Chyba} = 130 \text{ ppm}$$

$$\text{Nejistota Rušením} = 88,5 \mu V$$

$$\text{AbsolutníPřesnost} = \text{Hodnota} * (\text{VstupníChyba}) + \text{Hodnota} * (\text{KompenzovanáChyba}) + \text{NejistotaRušením}$$

$$\text{AbsolutníPřesnost} = \text{Hodnota} * (262,3 \text{ ppm}) + 88,5 \mu\text{V}$$

Tab. 3: Přehled nejistot pro analogové vstupy měřicí karty NIDAQ 6212

Rozsah [V]	Vstupní chyba [ppm]	Kompenzovaná chyba [ppm]	Nejistota rušením [μV]	Absolutní přesnost
± 10	132,3	130	88,50	Hodnota.(262,3 ppm) + 88,5 μV
± 5	142,3	132	44,70	Hodnota.(274,3 ppm) +44,7 μV
± 1	152,3	150	9,60	Hodnota (302,3 ppm) + 9,6 μV
± 0,2	192,3	232	5,70	Hodnota.(424,3 ppm) + 5,7 μV

3.6.2 Proudové sondy

- **HTP100S (Telcom)**
 - Proudový poměr 1000:1
 - Celková přesnost = 0.5% z jmenovité hodnoty proudu, 0,1% linearita % z jmenovité hodnoty proudu
 - $\delta_{iHTP100S} = 0,005 \cdot \text{Hodnoty} + 100 \text{ [mA]}$
- **HT200M. (Telcom)**
 - Proudový poměr 2000:1
 - Celková přesnost = 0.65% z jmenovité hodnoty proudu, 0,1% linearita % z jmenovité hodnoty proudu
 - $\delta_{iHT200M} = 0,0065 * \text{Hodnoty} + 200 \text{ [mA]}$

3.6.3 Výpočet nejistot

Přesnost měření proudů je dána přesností proudových sond a napěťových vstupů měřicí karty

$$\delta_i = \sqrt{\delta_{isondy}^2 + \delta_{ukarty}^2} \quad (103)$$

Výpočty efektivních hodnot jsou zatíženy chybou ze vzorkovaného signálu. Chyba efektivní hodnoty napětí je počítána

$$\Delta U_{ef} = \sigma u_{karty} + \frac{|\Delta u_A| \sum |u|}{\sum u^2} \quad (104)$$

Stejným vztahem je počítána chyba efektivní hodnoty proudu. Nejistoty činného výkonu je

$$\Delta P = \frac{1}{N} \sum |u| |\Delta i| + |i| |\Delta u| \quad (105)$$

Jednotlivé vzorky magnetického indukčního toku jsou zatíženy chybou a chyby dalších výsledků se počítají jako chyby nepřímých měření $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2} \quad (106)$$

Výpočty nepřímých měření je potřeba počítat s ohledem na to, že signál je vzorkovaný a každý vzorek má vlastní chybu. Např. intenzita magnetického pole H je počítána z nejistot jednotlivých proudů

$$\Delta H(k) = \sqrt{\left(\frac{\partial \left(\frac{N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2}{l} \right)}{\partial i_1} \right)^2 \cdot \Delta i_1^2 + \left(\frac{\partial \left(\frac{N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2}{l} \right)}{\partial i_2} \right)^2 \cdot \Delta i_2^2}$$

kde

$$\frac{\partial \left(-\frac{N_2 \cdot i_2}{l} \right)}{\partial i_1}, \frac{\partial \left(\frac{N_1 \cdot i_1}{l} \right)}{\partial i_2} = 0$$

$$\Delta H(k) = \sqrt{\left(\frac{N_1}{l} \right)^2 \cdot \Delta i_1^2 + \left(-\frac{N_2}{l} \right)^2 \cdot \Delta i_2^2}$$

$$\Delta H(k) = \sqrt{\frac{N_1^2}{l^2} \cdot \Delta i_1^2 + \frac{N_2^2}{l^2} \cdot \Delta i_2^2}$$

$$\Delta H(k) = \sqrt{\frac{N_1^2 \Delta i_1^2 + N_2^2 \Delta i_2^2}{l^2}} \quad (107)$$

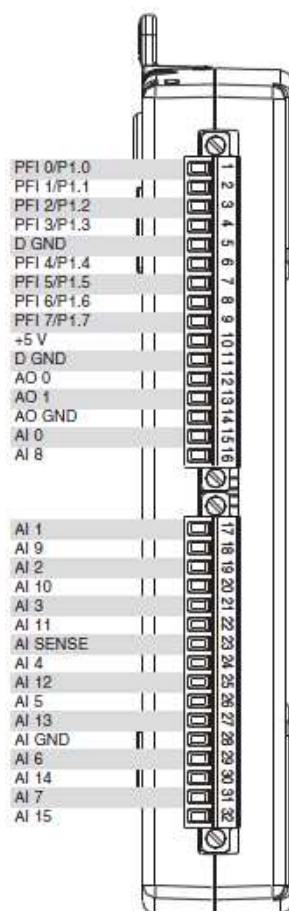
4 Hardware

4.1 Rozhraní a komunikace

Rozhraní realizováno vývojovým prostředím MATLAB. Komunikace je realizována dle specifikací výrobce měřicí karty NIDAQ 6212 (National Instrument), dále pak měřicí kartou, která se připojuje přes sběrnici USB, vhodná při připojení jiného počítače, obousměrnému provozu a velkou propustností (USB 2.0).

4.2 Měřicí karta NIDAQ

Měřicí karta NIDAQ 6212 je externí zařízení s analogovými/digitálními vstupy výstupy, které ovládáme pomocí programu MATLAB, přes sběrnici USB.

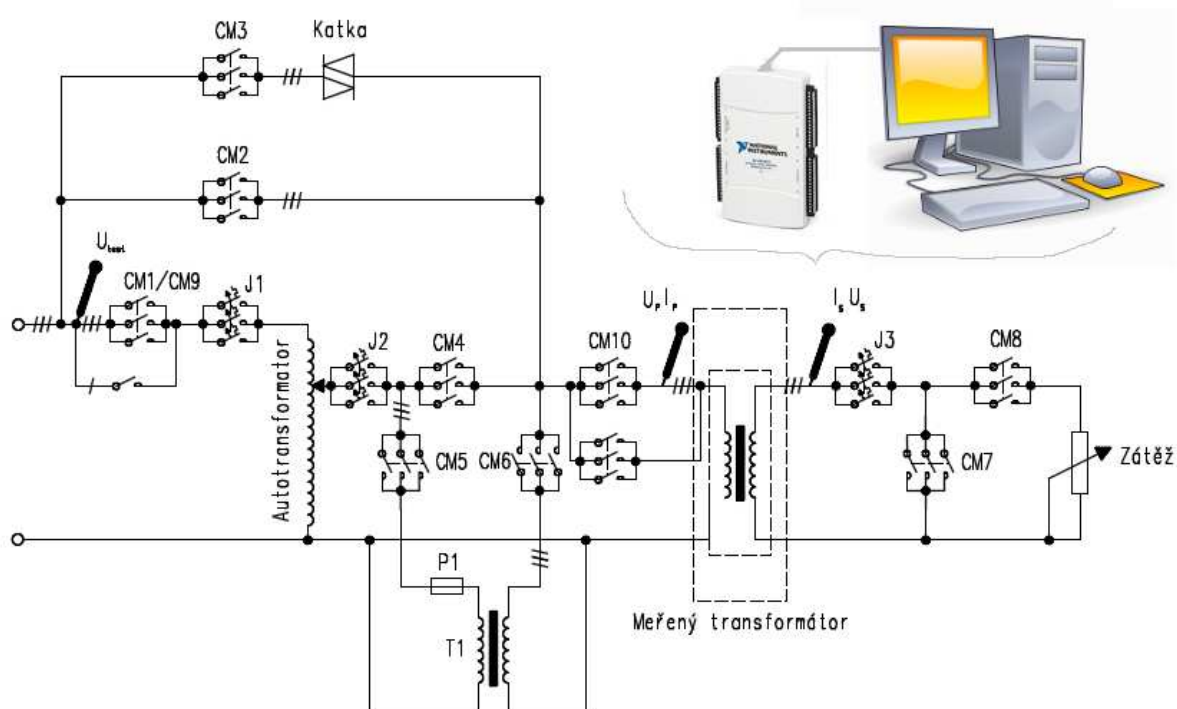


Obr. 10: Přehled pinů na měřicí kartě (AI/AO a IO)



Pomocí MATLAB-u získáváme data z měřicí karty a zároveň ji využíváme jako akční člen pro spínání jednotlivých stykačů, dle blokového schéma (viz. obr.11).

Na obr. 11 je znázorněno blokové schéma trafo testeru. Principy jednotlivých zkoušek a měření je popsáno v kapitolách 3.



Obr. 11: Blokové schéma trafo testeru

Tab. 4: Přehled funkcí jednotlivých stykačů

Stykač	Funkce
CM1	přívod k autotransformátoru
CM2	přívod přímo na primární stranu pro 3f transformátoru
CM3	přívod k tyristorovému modulu KATKA
CM4	výstup z autotransformátoru
CM5	přívod k snižujícím transformátorům, pro měření nakrátko
CM6	výstup k snižujícím transformátorům, pro měření nakrátko
CM7	zkratování sekundární strany transformátoru
CM8	zatížení transformátoru
CM9	přívod přímo na primární stranu pro 1f transformátoru
CM10	přepínání rozsahu proudových snímačů na primární straně transformátoru

Tab. 5: Přehled sepnutých stykačů, podle druhu zkoušek

Chod		Stykače									
		CM1	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	CM7	CM8	CM9	CM10
1f	Naprázdko	-	-	-	x	-	-	-	-	x	x
	Nakrátko	-	-	-	-	x	x	x	-	x	x
	Zátěž	-	-	-	x	-	-	-	x	x	x
3f	Naprázdko	x	-	-	x	-	-	-	-	-	x
	Nakrátko	x	-	-	-	x	x	x	-	-	x
	Zátěž	x	-	-	x	-	-	-	x	-	x
	KATKA	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-

Zdroj napájení, síť, je jištěna jističem D40.

Obvod je jištěn jističi:

- na primární straně před autotrafem C20A (J1 a J2)
- na sekundární straně B20A (J3)

Spínacími prvky jsou stykače

- 3RT1026-1BB40 24V DC – Siemens (CM10)
- 3RT1035-1BB40 24V DC – Siemens (CM1, CM2, CM3, CM4, CM8)
- 3RT1016-1BB41 24V DC – Siemens (CM5, CM6)
- LC1D50 24V DC (Siemens), CM7

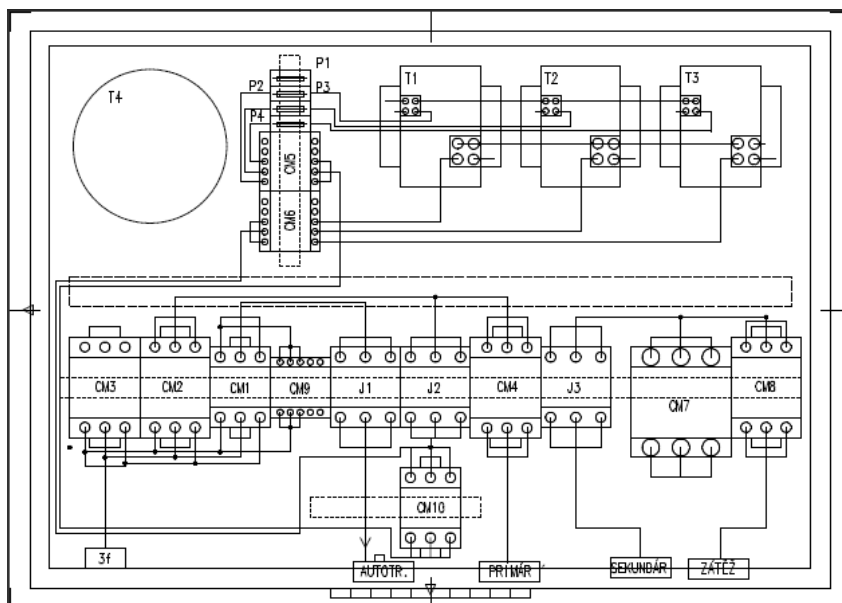
Proudové sondy (Hallův princip)

- HTP100S (Telcom) – pro sekundární proudy
- HT200M. (Telcom) – pro primární proudy

V primárním obvodu transformátoru je znázorněno 1f a 3f provoz, pro měření transformátorů jak 1f tak 3f, zajišťuje to stykač CM1 (3f) a CM9 (1f). Jištění zajišťujeme 3f jističem, pro oba druhy transformátorů.

Pro přehlednost v tab. 6. jsou vyznačeny jednotlivé stykače, sepnuté/rozepnuté, podle druhu měření.

Na dalším obrazovém příspěvku je rozložení jednotlivých hardwarových prvků v rozvodné skříni.



Obr. 12: Rozložení jednotlivých silových členů (Jx – jističe, CMxx – stykače, Px – pojistky, Tx - transformátory)



Obr. 13: Pohled na měřicí systém v reálu

5 Software

Programové vybavení a prostředí, kde měřicí a ovládací program vytvářel. Struktura jednotlivých celků, princip, ...

5.1 MATLAB

V automatizacích bývá problém vyhledat správný software, který by byl nejvhodnější, tzn. snadno modifikovatelný (v programové části), přehlednou obsluhou a dobrou spolehlivostí.

Pro splnění těchto nároků jsme zvolili MATLAB, který se v posledních letech prosadil v oblasti průmyslu a vzdělávání.

Co je to MATLAB?

MATLAB je numerické počítačové prostředí, pro tvorbu různých aplikací, obsahuje mnoho toolbox-ů, dále pak tbx, obsahující vždy jiný obor problematiky (Aerospace tbx., Bioinformatics tbx., Database tbx...) nejčastěji se MATLAB využívá pro počítání složitých numerických úloh, matematických modelů, najdeme jej i v průmyslu, kde se používá nejen na ovládání technologie, ale spíše pro modelové situace, kdy nás zajímá chování systému či produktu, předtím, než jej vytvoříme (mnohdy vyrobený model – fyzický, pro tyto účely je drahý).

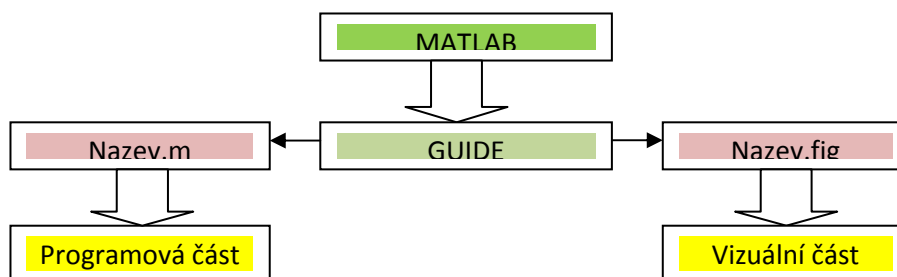
Pro dosažení grafického prostředí byl využit nástroj GUIDE, obsažený v MATLABU pro tvorbu grafické reprezentace programu s interaktivními prvky (tlačítka, editovatelné pole, ..).

Vlastní program byl vytvořen pomocí implementovaného jazyku v MATLABU.

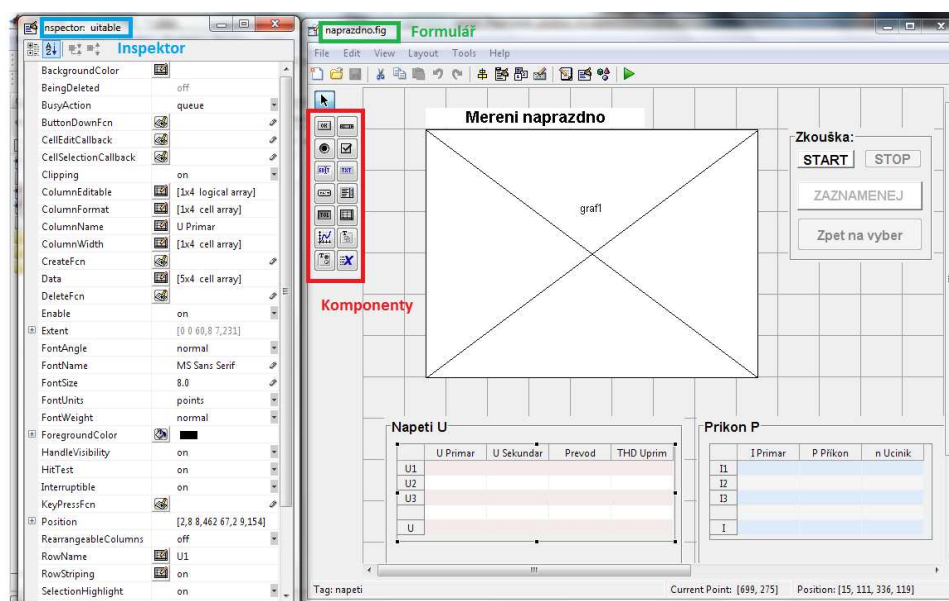
5.2 GUIDE

Programování v GUIDE v prostředí MATLAB je méně komplexní než v jazycích Delphi či C++. Jedná se o podobnou strukturu psaní příkazů, ale jak už bylo řečeno je to daleko méně obsáhlé na tvorbu komponent či přístupných objektů, které využíváte, až někdy poněkud strohé.

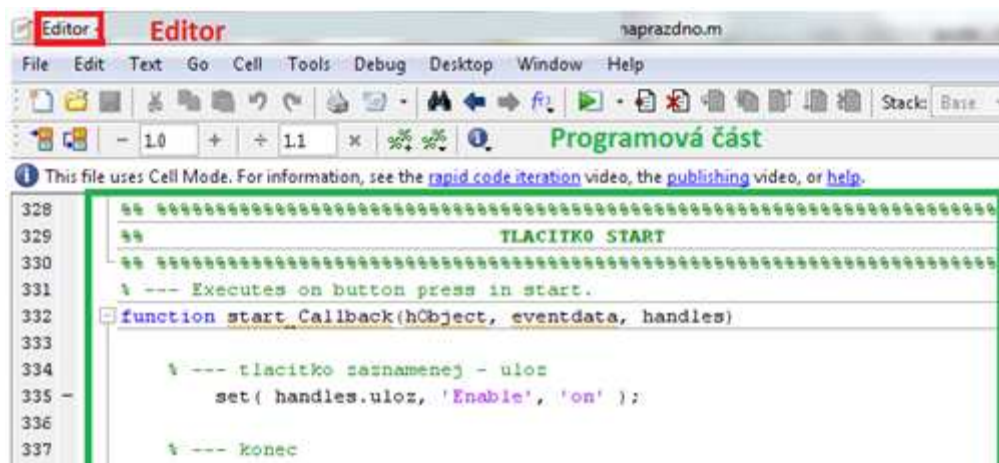
Při vytváření GUIDE – vizuální aplikace pod softwarem Matlab, se vám vytvoří formulář (figure), do kterého přidáváte jednotlivé komponenty (tlačítka, tabulky, panely, ...), které můžete následně upravit v inspektoru, jak vizuálně tak i programově (tzv. programové vlastnosti) viz Obr. 15..



Obr. 14: Vývojový diagram programování v GUIDE



Obr. 15: Prostředí pro vizualizaci programů - GUIDE

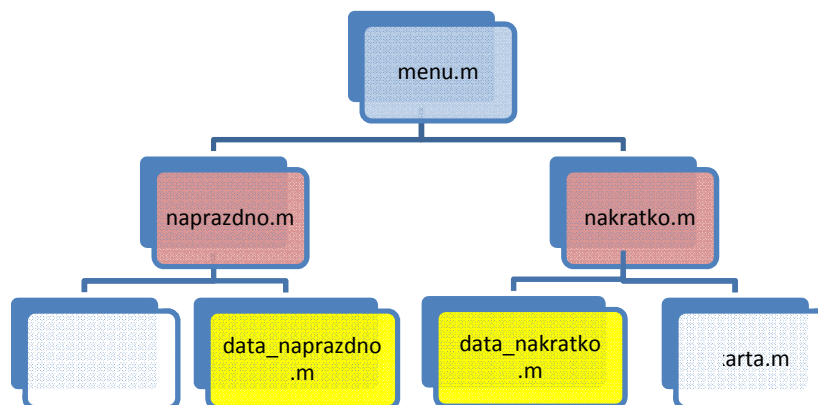


Obr. 16: Editor příkazů

Oba vytvořené soubory jsou propojeny a jeden ovlivňuje druhý, kruhová reference kde Nazev.fig je hlavní, starající se jen o viditelnou část uživatelem programu v hierarchii GUIDE. Nazev.m se stará o naprogramování a podružnou vizualizaci (enable, visible, ...).

5.3 Programová výbava

Programová výbava, proč zrovna tento pojem. Nejedná se o jeden program, ale o hierarchickou strukturu.



Obr. 17: Koncepte programu – hierarchická struktura

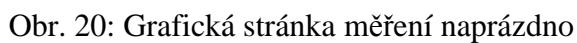
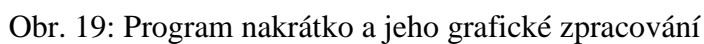
Hlavním spouštěcí program je *menu*, kde se zadávají parametry transformátoru, jedná se o šítkové údaje a konstrukční parametry.



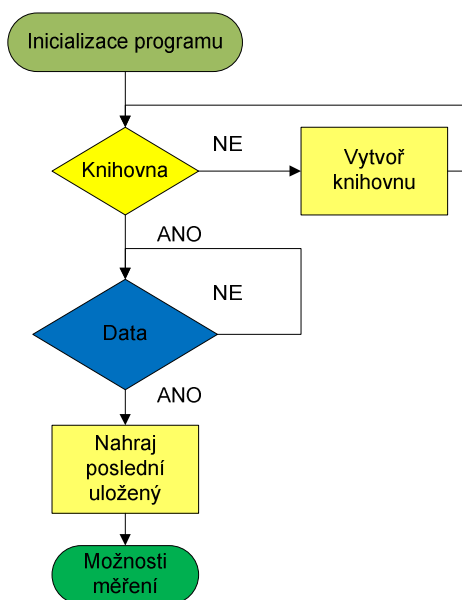
The screenshot shows the 'menu' program interface. It has a title bar 'menu' and a window with several sections:

- Transformator**: Two buttons, 'Jednofazovy' and 'Trifazovy' (highlighted in green).
- ŠITKOVÉ ÚDAJE**: A section for transformer data with various input fields and buttons.
 - Název souboru: SVED_multi_transformator
 - Typ: 0
 - vc.: 18754
 - rok výroby: 1986
 - jm. výkon ve [VA]: 1200
 - Výrobce: SVED
 - kmitocet Hz: 50
 - jm. napětí V: P 230 350
 - provoz: prerus.
 - S 230 350
 - zapojení: Dy
 - T 230 350
 - rada: -
 - jm. proud A: 12
 - izol. tr.: -
 - zkr. napětí: % 2
 - zkr. proud:
 - stupen kriti: 00
 - max. doba. zkratu [ms]:
 - druh chlazení: A
 - Pozn.: Laboratorní podmínky
 - hmotnost [kg]: 125
- KONSTRUKČNÍ ÚDAJE**: A section for construction data with input fields and buttons.
 - Střední délka silnic [m]: 0.95
 - Průřez jádra [m²]: 0.0005
 - Pocet zavitu: P 140 S 140 T 140
- Buttons**: 'SAVE', 'Load', 'Naprazdno', 'Nakratko', and 'Zatez'.

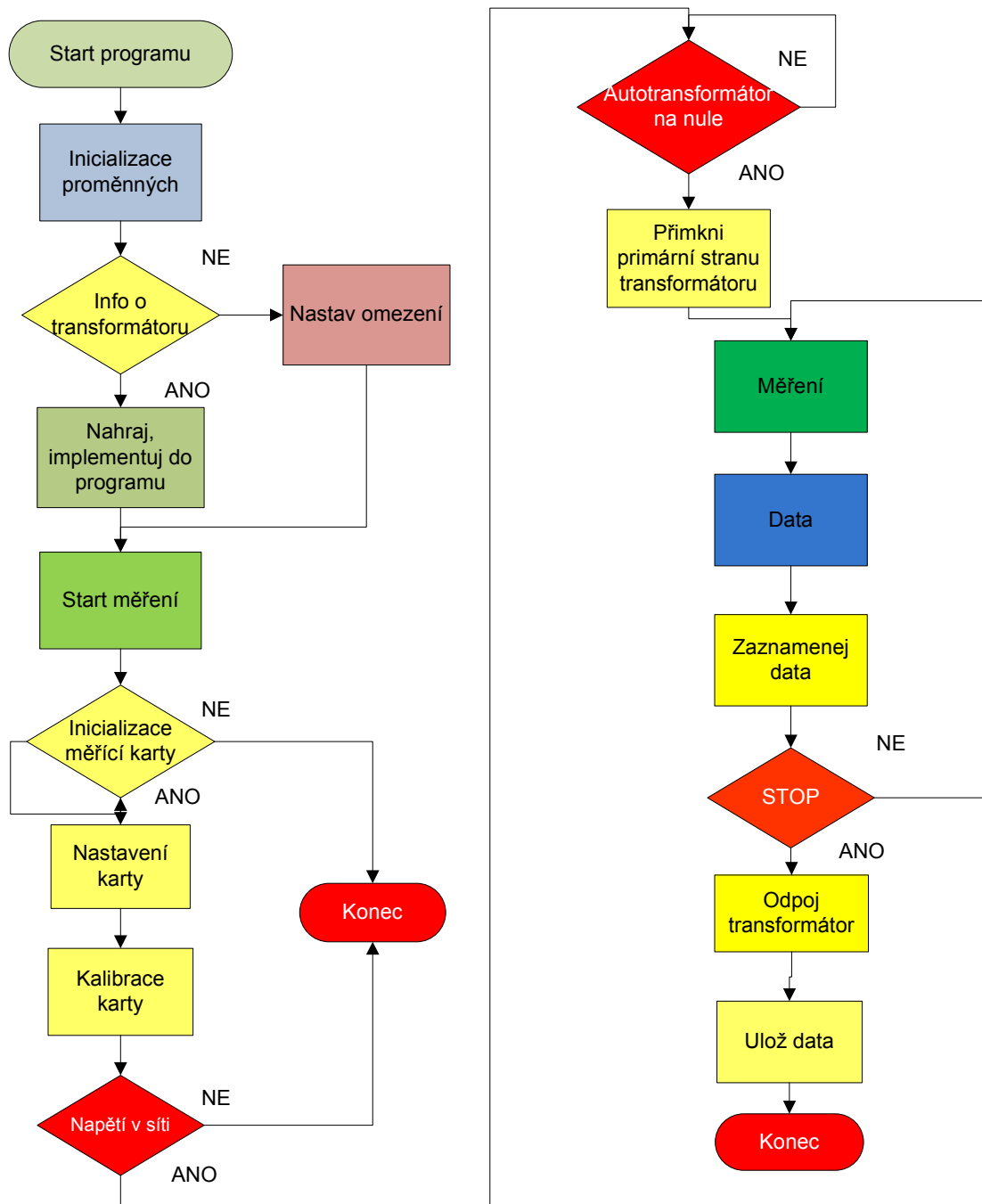
Obr. 18: Program pro zadávání a editaci transformátoru - *menu*



Struktura jednotlivých programových celků je principiálně znázorněna na blokových schématech viz. Obr. 21 a Obr. 22.



Obr. 21: Blokové schéma programu - *menu*



Obr. 22: Blokové schéma programu - měření

6 Obsluha pracoviště

Obsluha, jakož to uživatel použije pouze periferie počítače a zapínací tlačítko na měřicí stanici. Žádná manipulace se zařízením, zkušebním transformátorem není vyžadována.

6.1 Kontrola zařízení

Na prvním místě je potřeba zjistit zda je měřicí stanice připojena do sítě (klasický 5 kolíková 3f zásuvka). Dalším krokem je kontrola transformátoru zda je připojen správně po (tj. primár na primár, sekundár na sekundár). Pokud vše je v pořádku zapneme PC a spustíme MATLAB. Otevřeme si požadovaný adresář a spustíme program přes příkazový řádek, do kterého napíšeme *menu*.

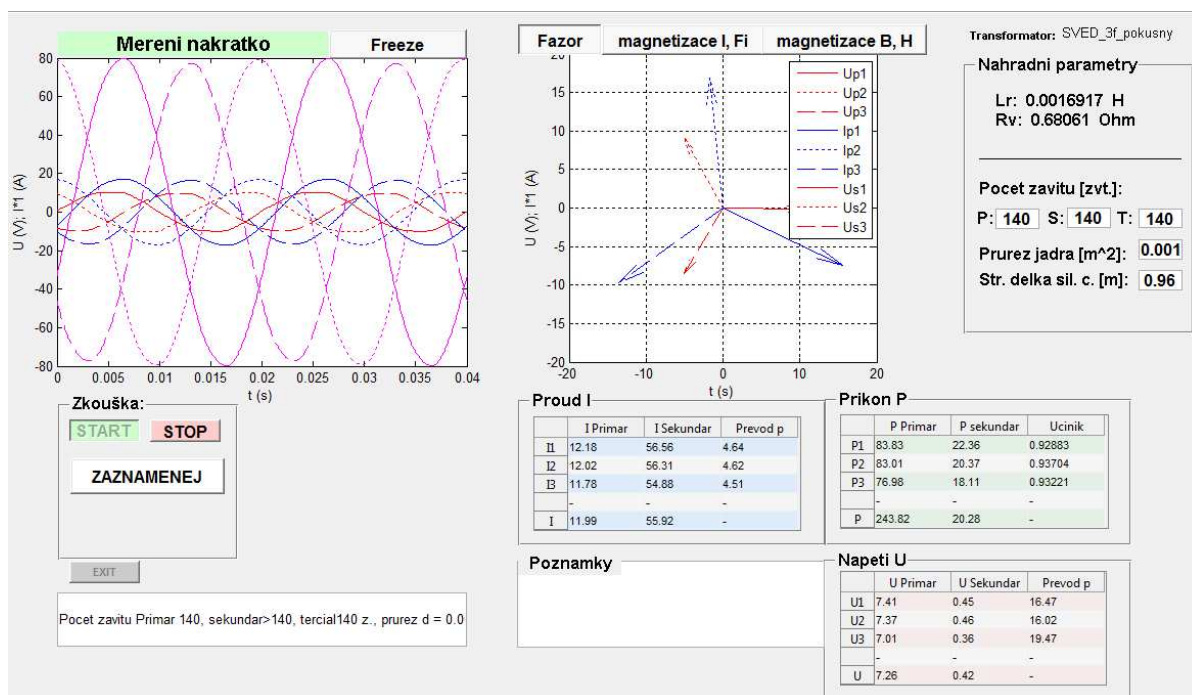
Vyplníte základní údaje o transformátoru (viz. Obr. 21: Blokové schéma programu - *menu*). A Přestoupíte k vlastnímu měření, dle nabídky programu, tj. Naprázdno, nakrátko či měření se zátěží.

POZOR! Z důvodů používání této stanice je umožněno měřit i bez udání hodnot. Měřicí systém pak slouží jako regulovaný zdroj napětí s možností monitorování napětí a proudů jak na vstupu tak na výstupu!

6.2 Vlastní měření

Zde se budeme zabírat popisem měření.

6.2.1 Struktura měřícího rozhraní



Obr. 23: Program v režimu měření nakrátko

Na Obr. 23. je vizuální reprezentace programu v měřícím režimu, resp. v měření nakrátko. Nejdůležitější ovládací částí programu jsou tlačítka *START*, *STOP* a *ZAZNAMENEJ*, slouží jak už jejich název napovídá k určitým operacím v programu.

START

- Inicializace karty, nastavení rozsahu, kontrola, měření

STOP

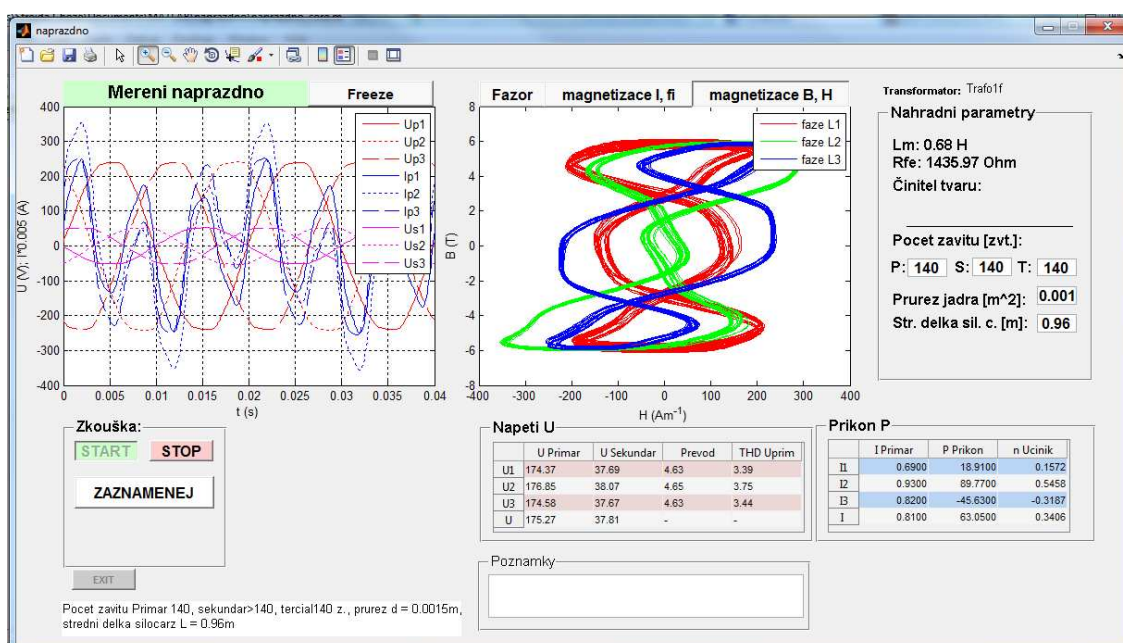
- Vypnutí napájení stykačů, uložení dat, příprava programu pro další použití

ZAZNAMENEJ

- Umožňuje ukládání tabulkových hodnot do strukturované tabulky, každé stisknutí je jeden řádek ve výsledném souboru.

Soubor s hodnotami nalezneme na disku C: v C:/dokumenty/trafotester/data.

Méně významná, přesto důležitá znaménka nalezneme nad oblastí druhého grafu tj. *Fazor, magnetizace I, Fi a magnetizace B, H*. Tyto tlačítka umožňují vykreslit magnetizační charakteristiky proudu I na indukční tok ϕ a intenzitu magnetického pole H na indukci B .



Obr. 24: Program v režimu naprázdno

Na Obr. 24 vidíme ukázkou vykreslování B , H (viz. druhý graf na Obr. 24) diagramu vypovídající o magnetizaci transformátoru. Je zřejmé že transformátor pracuje naprázdno – zakřivení magnetizačních křivek a jejich protínání. Dále pak z průběhu proudů se dá odhalit jak je transformátor zapojen (určovací metody jsou dobře popsány v knize Transformátory, teoretické základy od Eugeniuse Jezierski).

6.3 Zpracování měření

Získaná data pomocí programu zpracujeme do přehledných tabulek a grafů..

6.4 Měření naprázdno

Při využití programu k ukládání dat přes tlačítko *Zaznamenej* se vygeneruje jako soubor pro Matlab (*.m) tak i jako tabulku pro Excel (*.xls). Výsledná tabulka vypadá následovně:

Tab. 6: Přehled napětí naprázdno

U_{1p0} [V]	U_{2p0} [V]	U_{3p0} [V]	U_0 [V]	U_{1s0} [V]	U_{2s0} [V]	U_{3s0} [V]	U_{s0} [V]
0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
18,8	19,9	18,7	19,1	4,1	4,3	4,0	4,1
38,6	41,5	39,5	39,9	8,3	9,0	8,5	8,6
58,3	59,3	57,9	58,5	12,6	12,8	12,5	12,6
78,7	83,4	79,9	80,7	17,0	18,0	17,3	17,4
97,7	102,8	99,2	99,9	21,1	22,2	21,4	21,6
125,2	130,9	125,6	127,2	27,0	28,3	27,1	27,5
142,2	145,3	140,9	142,8	30,7	31,4	30,4	30,8
165,1	170,8	165,6	167,2	35,7	36,9	35,8	36,1
183,4	188,5	183,9	185,3	39,6	40,7	39,7	40,0
196,7	202,8	198,5	199,3	42,5	43,8	42,9	43,0
216,6	223,2	218,7	219,5	46,8	48,2	47,2	47,4
236,6	243,2	238,3	239,4	51,1	52,5	51,5	51,7

Tab. 7: Proudů naprázdno

I_{1p0} [A]	I_{2p0} [A]	I_{3p0} [A]	I_0 [A]
0	0	0	0
0,4	0,4	0,4	0,4
0,6	0,6	0,5	0,6
0,8	0,9	0,8	0,9
0,9	0,9	0,8	0,9
1,0	1,1	0,9	1,0
1,2	1,3	1,1	1,2
1,1	1,1	1,0	1,1
1,3	1,5	1,3	1,3
1,3	1,5	1,3	1,4
1,3	1,7	1,4	1,5
1,4	1,9	1,6	1,6
1,4	2,1	1,7	1,8

Tab. 8: Přehled primárních výkonů naprázdno

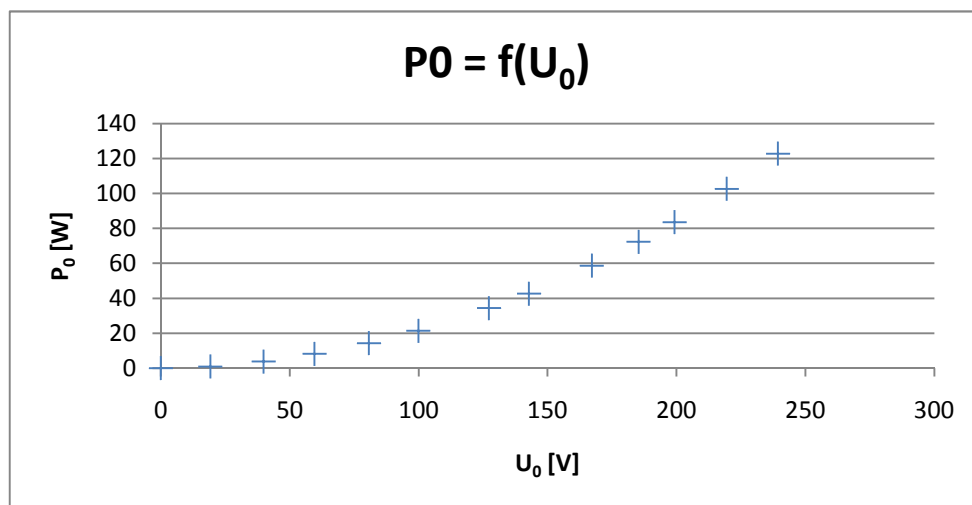
P1 [W]	P2 [W]	P3 [W]	P [W]	cos φ1 [-]	cos φ2 [-]	cos φ3 [-]	cos φ [-]
0	0	0	0	0	0	0	0
1,6	2,1	-2,8	0,9	0,20	0,25	-0,41	0,12
1,4	12,1	-9,7	3,8	0,06	0,48	-0,45	0,17
5,2	12,1	-10,4	6,9	0,19	0,48	-0,50	0,17
9,4	26,3	-27,5	8,2	0,20	0,50	-0,62	0,17
15,1	38,6	-39,3	14,3	0,22	0,50	-0,60	0,20
18,7	56,1	-53,4	21,4	0,20	0,52	-0,58	0,22
51,1	72,7	-89,4	34,4	0,36	0,43	-0,65	0,23
60,3	48,7	-66,4	42,6	0,40	0,29	-0,50	0,28
67,1	110,5	-119,0	58,6	0,33	0,43	-0,57	0,28
67,6	116,4	-112,0	72,3	0,29	0,40	-0,48	0,29
59,4	152,9	-128,8	83,6	0,23	0,45	-0,46	0,29
57,0	201,4	-155,8	102,6	0,19	0,47	-0,44	0,29
63,9	231,2	-170,4	122,7	0,19	0,46	-0,42	0,29

Pro tučně zvýrazněné hodnoty z měření naprázdno jsou nejistoty:

$$\begin{aligned}
 U_{1p0} &= (58.278 \pm 0.041) \text{ V}; & U_{1s0} &= (12.6023 \pm 0.009) \text{ V}; \\
 U_{2p0} &= (59.337 \pm 0.042) \text{ V}; & U_{2s0} &= (12.772 \pm 0.0091) \text{ V}; \\
 U_{3p0} &= (57.856 \pm 0.041) \text{ V}; & U_{3s0} &= (12.4819 \pm 0.0089) \text{ V}; \\
 U_0 &= (58.49 \pm 0.12) \text{ V}; & U_{s0} &= (12.619 \pm 0.027) \text{ V};
 \end{aligned}$$

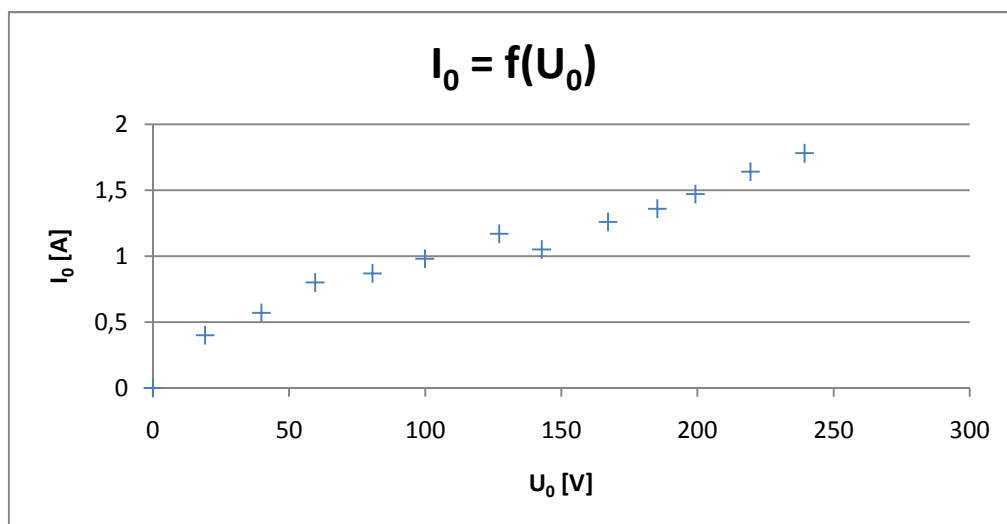
$$\begin{aligned}
 I_{1p0} &= (0.82 \pm 0.36) \text{ A}; & I_{1s0} &= (0.00352 \pm 0.10071) \text{ A}; \\
 I_{1p0} &= (0.93 \pm 0.46) \text{ A}; & I_{2s0} &= (0.00344 \pm 0.10069) \text{ A}; \\
 I_{1p0} &= (0.81 \pm 0.38) \text{ A}; & I_{3s0} &= (0.00332 \pm 0.10066) \text{ A}; \\
 I_0 &= (0.85 \pm 1.3) \text{ A}; & I_{s0} &= (0.0034 \pm 0.3024) \text{ A};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{10} &= (5 \pm 10) \text{ W}; & S_{10} &= (16 \pm 58) \text{ VA}; \\
 P_{20} &= (12 \pm 11) \text{ W}; & S_{20} &= (16 \pm 58) \text{ VA}; \\
 P_{30} &= (-10 \pm 10) \text{ W}; & S_{30} &= (16 \pm 58) \text{ VA}; \\
 P_0 &= (8 \pm 32) \text{ W}; & S_0 &= (53 \pm 84) \text{ VA};
 \end{aligned}$$



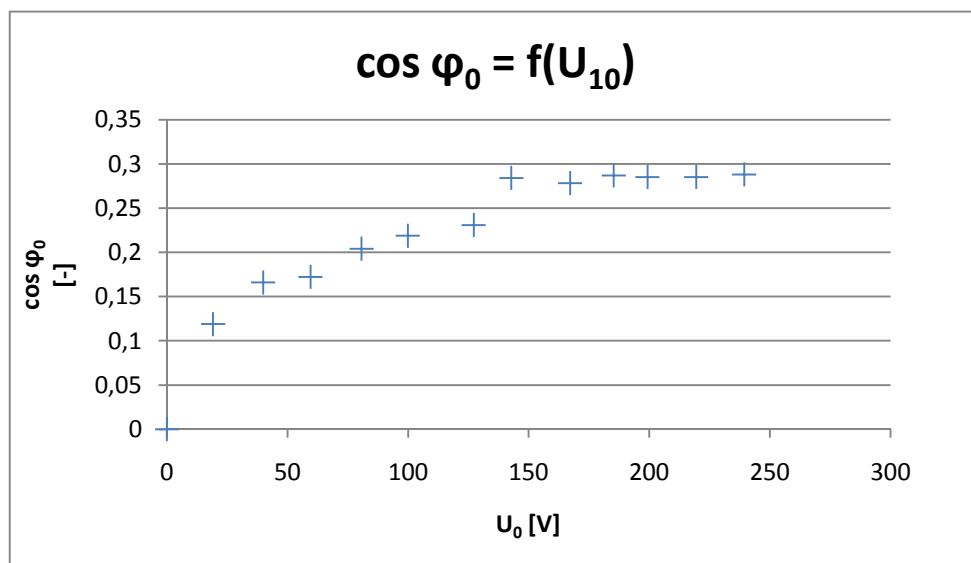
Obr. 25: Závislost činného výkonu na napětí naprázdno

Na obr. 26. vidíme exponenciální nárůst příkonu naprázdno při zvyšujícím se napětí.



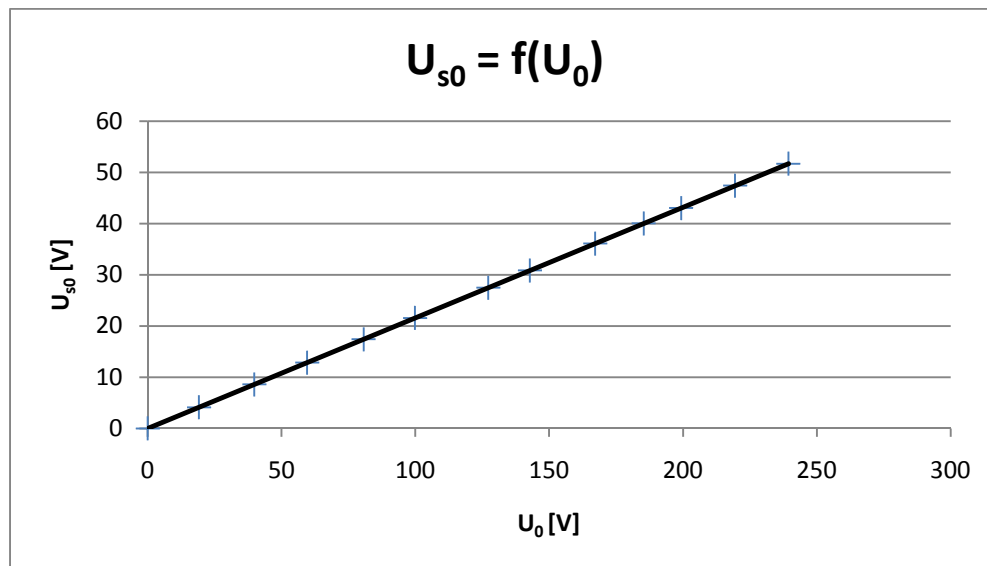
Obr. 26: Volt-ampérová charakteristika transformátoru naprázdno

Obr. 27 vypovídá o lineární závislosti napětí naprázdno a proudu naprázdno.



Obr. 27: Účinník naprázdno v závislosti na napětí naprázdno

Závislost na Obr. 27 vypovídá o ustálení účinníku naprázdno v mezích, kde jalový výkon je na maximální úrovni při chodu transformátoru.



Obr. 28: Vstupní a výstupní napětí naprázdno

Výstupní a výstupní napěťová charakteristika prozrazuje lineární závislost primární strany transformátoru na sekundární straně.

6.5 Měření nakrátko

Při využití programu k ukládání dat přes tlačítko *Zaznamenej* se vygeneruje jako soubor pro Matlab (*.m) tak i jako tabulku pro Excel (*.xls). Výsledná tabulka vypadá následovně:

Tab. 9: Tabulka jednotlivých napětí nakrátko

U_{1pk} [V]	U_{2pk} [V]	U_{3pk} [V]	U_k [V]	U_{1sk} [V]	U_{2sk} [V]	U_{3sk} [V]	U_{sk} [V]
0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,7	0,8	0,6	0,7	0,14	0,16	0,14	0,15
1,4	1,6	1,4	1,5	0,30	0,35	0,29	0,31
2,0	2,2	1,9	2,0	0,43	0,48	0,41	0,44
2,5	2,7	2,4	2,5	0,53	0,59	0,52	0,54
2,9	3,2	2,8	3,0	0,63	0,69	0,61	0,64
3,9	4,3	3,8	4,0	0,85	0,93	0,83	0,87
4,6	4,9	4,5	4,6	0,98	1,06	0,96	1,00
5,2	5,5	5,0	5,2	1,11	1,19	1,08	1,13
5,8	6,2	5,7	5,9	1,26	1,34	1,22	1,27
6,33	6,29	6,25	6,27	0,41	0,43	0,32	0,39
7,1	7,4	6,8	7,1	1,53	1,60	1,47	1,53
7,4	7,8	7,2	7,5	1,61	1,68	1,55	1,61
7,9	8,3	7,7	8,0	1,71	1,78	1,65	1,72
8,4	8,7	8,1	8,4	1,81	1,88	1,75	1,82

Tab. 10: Tabulka jednotlivých proudů nakrátko

I_{1pk} [A]	I_{2pk} [A]	I_{3pk} [A]	I_{pk} [A]	I_{1sk} [A]	I_{2sk} [A]	I_{3sk} [A]	I_{sk} [A]
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,1	1,2	1,2	1,2	3,8	4,7	4,6	4,4
2,3	2,6	2,5	2,4	9,2	10,6	10,3	10,0
3,3	3,6	3,4	3,5	13,9	15,4	14,7	14,6
4,2	4,5	4,3	4,3	17,8	19,3	18,4	18,5
5,1	5,3	5,0	5,1	21,6	23,0	21,9	22,1
6,6	6,9	6,5	6,7	29,4	31,1	29,6	30,0
7,7	7,9	7,6	7,7	34,4	36,0	34,4	34,9
8,7	8,9	8,5	8,7	39,1	40,6	38,7	39,4
9,8	10,0	9,5	9,8	44,4	45,9	43,5	44,6
10,36	10,27	10,06	10,23	48,1	48,46	46,80	48,17
11,8	12,0	11,4	11,7	53,5	55,0	52,4	53,6
12,4	12,6	12,0	12,4	56,5	57,9	55,3	56,6

13,3	13,4	12,8	13,2	60,3	61,8	59,0	60,4
14,1	14,2	13,6	13,9	64,1	65,4	62,6	64,0

Tab. 11: Tabulka jednotlivých výkonů a účinností

P_{1k} [W]	P_{2k} [W]	P_{3k} [W]	P_k [W]	$\cos \varphi_{1k}$ [-]	$\cos \varphi_{2k}$ [-]	$\cos \varphi_{3k}$ [-]	$\cos \varphi_k$ [-]
0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,6	0,7	0,7	1,9	0,81	0,74	0,86	0,80
2,8	3,4	3,0	9,3	0,89	0,83	0,91	0,80
5,9	6,9	6,0	18,7	0,89	0,85	0,91	0,87
9,3	10,5	9,3	29,1	0,90	0,87	0,92	0,89
13,3	14,9	12,9	41,1	0,90	0,87	0,92	0,89
23,2	26,1	22,9	72,2	0,90	0,88	0,92	0,90
31,4	34,7	30,7	96,8	0,90	0,89	0,91	0,90
40,2	43,8	38,5	122,5	0,90	0,89	0,91	0,90
51,5	55,7	49,2	156,4	0,90	0,90	0,91	0,90
60,9	60,5	56,4	177,8	0,90	0,90	0,92	0,90
74,8	79,7	70,8	225,4	0,90	0,90	0,92	0,90
83,2	88,3	79,1	250,5	0,90	0,90	0,91	0,91
94,8	100,3	89,7	284,8	0,90	0,90	0,91	0,91
106,5	112,0	100,4	319,0	0,90	0,91	0,91	0,91

Pro tučně zvýrazněné hodnoty z měření nakrátko jsou nejistoty:

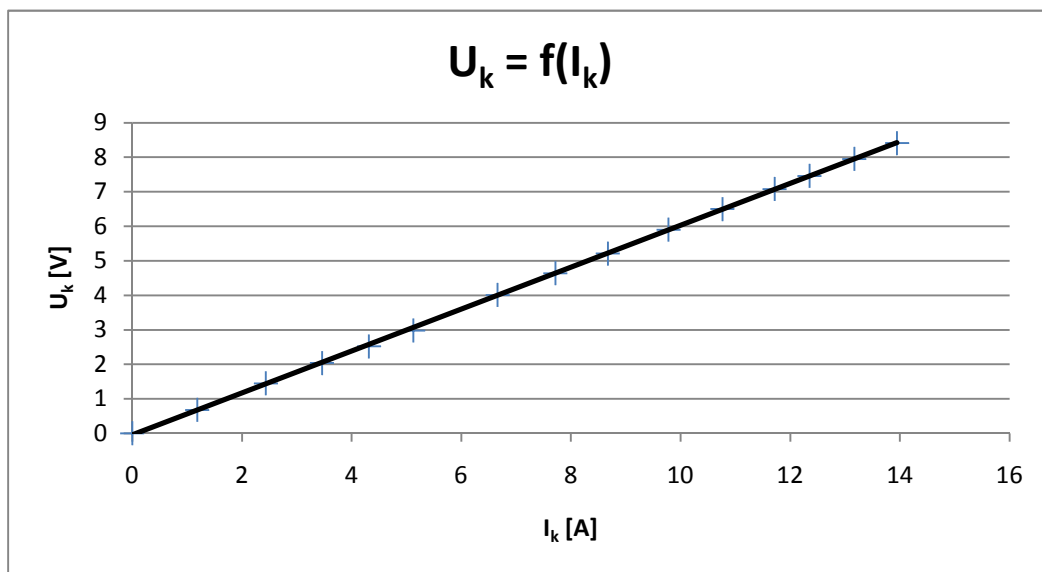
$$\begin{aligned}
 U_{1pk} &= (6.3247 \pm 0.0046) \text{ V}; & U_{1sk} &= (0.40196 \pm 0.0004) \text{ V}; \\
 U_{2pk} &= (6.2893 \pm 0.0046) \text{ V}; & U_{2sk} &= (0.42937 \pm 0.00042) \text{ V}; \\
 U_{3pk} &= (6.0154 \pm 0.0044) \text{ V}; & U_{3sk} &= (0.324 \pm 0.00035) \text{ V}; \\
 U_k &= (6.21 \pm 0.014) \text{ V}; & U_{sk} &= (0.3851 \pm 0.0012) \text{ V};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{1pk} &= (10.36 \pm 0.25) \text{ A}; & I_{1sk} &= (48.1 \pm 9.6) \text{ A}; \\
 I_{2pk} &= (10.27 \pm 0.24) \text{ A}; & I_{2sk} &= (48.1 \pm 9.6) \text{ A}; \\
 I_{3pk} &= (10.06 \pm 0.24) \text{ A}; & I_{3sk} &= (46.8 \pm 9.4) \text{ A}; \\
 I_k &= (10.23 \pm 0.73) \text{ A}; & I_{sk} &= (48 \pm 29) \text{ A};
 \end{aligned}$$

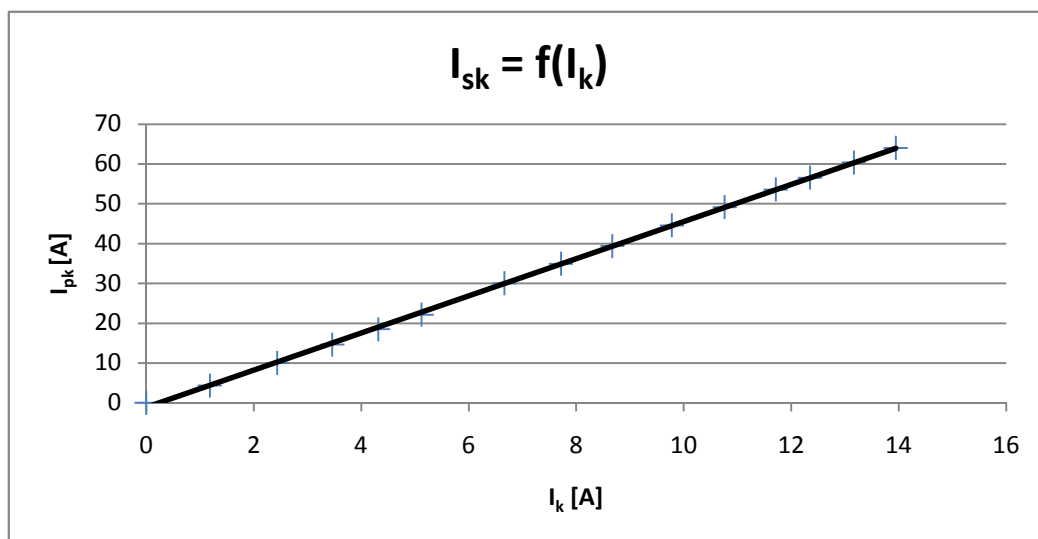
$$\begin{aligned}
 P_{1k} &= (60.9 \pm 1.2) \text{ W}; & S_{1k} &= (66 \pm 12) \text{ VA}; \\
 P_{2k} &= (60.5 \pm 1.1) \text{ W}; & S_{2k} &= (66 \pm 12) \text{ VA}; \\
 P_{3k} &= (56.4 \pm 1.1) \text{ W}; & S_{3k} &= (66 \pm 12) \text{ VA};
 \end{aligned}$$

$$P_k = (177.8 \pm 3.4) \text{ W}; \quad S_k = (191 \pm 15) \text{ VA};$$

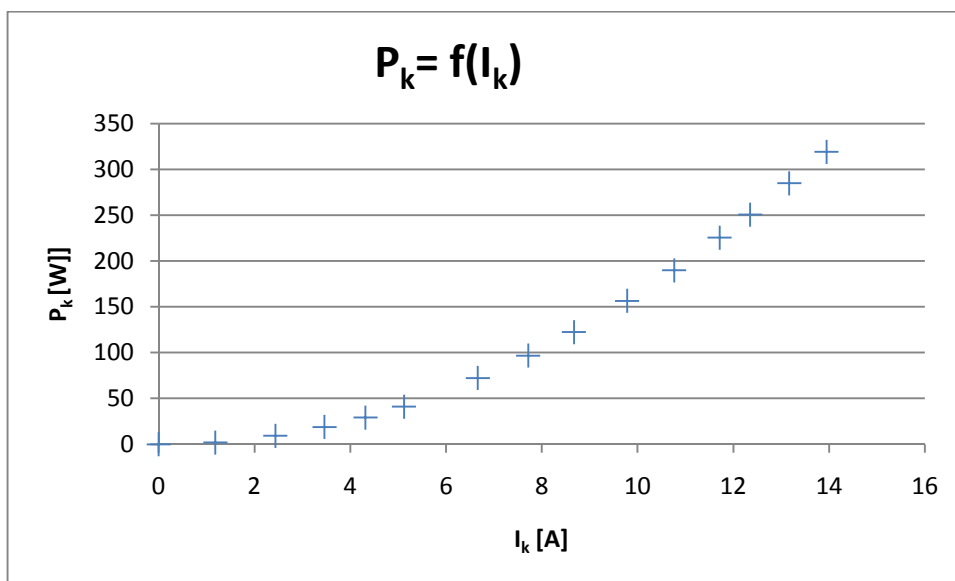
Na následujících obrazových příspěvcích nalezneme výsledné charakteristiky, určující transformátor.



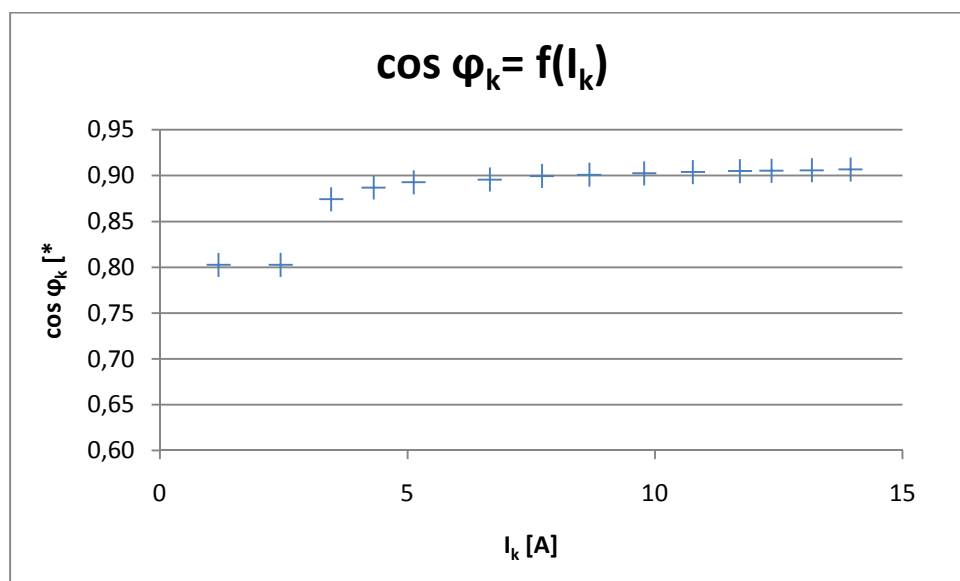
Obr. 29: Volt-ampérová charakteristika transformátoru v chodu nakrátko



Obr. 30: Sekundární proud v závislosti na primárním proudu



Obr. 31: Vstupní charakteristika, závislost primárního výkonu na primárním proudu



Obr. 32: Účinník v závislosti na primárním proudu nakrátko

7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo teoreticky vysvětlit a popsat zkoušky transformátorů, vytvořit program pro tyto zkušební postupy a zakomponovat jej do současného pracoviště.

Hlavním podnětem bylo vytvořit úlohu pro studenty se zaměřením na elektrotechniku, v rámci mnoha předmětů (Elektrotechnických výkonových členů, Elektrických obvodů...).

Na základě studia norem ČSN a odborné literatury, týkající se měření transformátorů bylo v rámci bakalářské práce vytvořeno měřicí pracoviště pro provádění kusových zkoušek transformátorů a transformátorků (tj. naprázdno, nakrátko a se zátěží).

Při programování v prostředí Matlab bylo řešeno mnoho komplikací. A to hlavně z důvodu nedokonalých možností vizuálních komponent (např. na buňku tabulky se dá odkazovat jen při předávání textu, barva, styl apod. je statický...). Přes tyto nedostatky se jedná o výborný prostředek pro návrh aplikací pro široké užití a snadnou modifikaci.

Při návrhu programu a jeho implementaci do pracoviště bylo nutno překonat mnoho nedostatků. Převážně šlo dlouhé odezvy mezi ukládáním dat do paměti PC, které jsou dané především počtem posílaných dat (v 3f režimu měříme 14 veličin). Proto byl program konstruován jako cyklicky se opakující rutina, s možností vnějšího zásahu obsluhy.

Jako ukázkou funkce programu byla provedena měření na nastavitelném transformátoru E.S.H.F. 3TRC 62.100 (358.5/296/83/40//2x42 V, 10 kVA), který posloužil pro ověření funkčnosti měřicího pracoviště a vytvořeného programu. Programy pro měření naprázdno a nakrátko provádějí nezbytné ověření parametrů napájecího zdroje ve shodě s platnými normami, provádějí vlastní měření a výpočet smluvních parametrů.

Výsledkem bakalářské práce je plnoautomatické měřicí pracoviště pro transformátory. Ovšem stále zůstává mnoho způsobů jak ho rozšířit a zdokonalit, např. měření přechodových dějů, přenos nesymetrické zátěže atp.



Seznam obrázků

OBR. 1: NÁHRADA ČTYŘPÓLU ŠESTI IMPEDANCEMI (MŮSTKOVÝ ČLÁNEK JE EKIVALENTNÍ S KŘÍŽOVÝM ČLÁNKEM)	16
OBR. 2: NÁHRADA TROJPÓLU Π -ČLÁNKEM OBSAHUJÍCÍ TŘI IMPEDANCE. Π -ČLÁNEK LZE	16
OBR. 3: TRANSFORMÁTOR JAKO DVOJBRAN.....	17
OBR. 4: ZÁKLADNÍ OBVODOVÝ MODEL TRANSFORMÁTORU	19
OBR. 5: OBVODOVÝ MODEL TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ	20
OBR. 6: OBVODOVÝ MODEL TRANSFORMÁTORU PROUDU	22
OBR. 7: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPRÁZDNO	24
OBR. 8: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAKRÁTKO	32
OBR. 9: SCHÉMA ZAPOJENÍ TRANSFORMÁTORU SE ZÁTĚŽÍ	38
OBR. 10: PŘEHLED PINŮ NA MĚŘÍCÍ KARTĚ (AI/AO A IO)	43
OBR. 11: BLOKOVÉ SCHÉMA TRAFO TESTERU	45
OBR. 12: ROZLOŽENÍ JEDNOTLIVÝCH SILOVÝCH ČLENŮ (JX – JISTIČE, CMXX – STYKAČE, PX – POJISTKY, TX – TRANSFORMÁTORY) ..	47
OBR. 13: POHLED NA MĚŘÍCÍ SYSTÉM V REÁLU	47
OBR. 14: VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMOVÁNÍ V GUIDE	49
OBR. 15: PROSTŘEDÍ PRO VIZUALIZACI PROGRAMŮ - GUIDE	49
OBR. 16: EDITOR PŘÍKAZŮ	50
OBR. 17: KONCEPCE PROGRAMU – HIERARCHICKÁ STRUKTURA	51
OBR. 18: PROGRAM PRO ZADÁVÁNÍ A EDITACI TRANSFORMÁTORU - MENU	51
OBR. 19: PROGRAM NAKRÁTKO A JEHO GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ.....	52
OBR. 20: GRAFICKÁ STRÁNKA MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	52
OBR. 21: BLOKOVÉ SCHÉMA PROGRAMU - MENU	53
OBR. 22: BLOKOVÉ SCHÉMA PROGRAMU - MĚŘENÍ.....	54
OBR. 23: PROGRAM V REŽIMU MĚŘENÍ NAKRÁTKO	56
OBR. 24: PROGRAM V REŽIMU NAPRÁZDNO.....	57
OBR. 25: ZÁVISLOST ČINNÉHO VÝKONU NA NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.....	60
OBR. 26: VOLT-AMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA TRANSFORMÁTORU NAPRÁZDNO	60
OBR. 27: ÚČINÍK NAPRÁZDNO V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.....	61
OBR. 28: VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ NAPRÁZDNO	61
OBR. 29: VOLT-AMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA TRANSFORMÁTORU V CHODU NAKRÁTKO	64
OBR. 30: SEKUNDÁRNÍ PROUD V ZÁVISLOSTI NA PRIMÁRNÍM PROUDU.....	64
OBR. 31: VSTUPNÍ CHARAKTERISTIKA, ZÁVISLOST PRIMÁRNÍHO VÝKONU NA PRIMÁRNÍM PROUDU.....	65
OBR. 32: ÚČINÍK V ZÁVISLOSTI NA PRIMÁRNÍM PROUDU NAKRÁTKO.....	65



Seznam tabulek

TAB. 1: PŘEHLED PŘENOSOVÝCH PARAMETRŮ ČTYŘPÓLŮ	18
TAB. 2: PŘEHLED SPECIFIKACE KARTY PRO VÝPOČET NEJISTOT PRO ROZSAHY 0,2 – 10 V	40
TAB. 3: PŘEHLED NEJISTOT PRO ANALOGOVÉ VSTUPY MĚŘÍCÍ KARTY NIDAQ 6212	41
TAB. 4: PŘEHLED FUNKCÍ JEDNOTLIVÝCH STYKAČŮ	45
TAB. 5: PŘEHLED SEPNUÝCH STYKAČŮ, PODLE DRUHU ZKOUŠEK	46
TAB. 6: PŘEHLED NAPĚTÍ NAPRÁZDNO	58
TAB. 7: PROUDY NAPRÁZDNO	58
TAB. 8: PŘEHLED PRIMÁRNÍCH VÝKONŮ NAPRÁZDNO	59
TAB. 9: TABULKA JEDNOTLIVÝCH NAPĚTÍ NAKRÁTKO	62
TAB. 10: TABULKA JEDNOTLIVÝCH PROUDŮ NAKRÁTKO	62
TAB. 11: TABULKA JEDNOTLIVÝCH VÝKONŮ A ÚČINÍKŮ	63

Seznam použité literatury

- [1] Doc. Ing. ČERMÁK, CSc, Tomáš ; Prof. Ing. KEPPERT, CSc, Svetozar. Elektrické stroje : I. Transformátory. II. Ostrava : Iediční středisko VŠB, 1984. 142 s., s. 4
- [2] PATOČKA, Miroslav. Několik poznámek k transformátoru. Brno : Symep, 2004. 28 s. Oborová práce. FEKT VUT Brno. s. 12
- [3] Ing. NOVÁK, Miroslav. Přechodový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacích proudů. Liberec, 2003. 158 s. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [4] Ing. NOVÁK, Miroslav. Přechodový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacích proudů. Přílohy k disertační práci Liberec, 2003. 95 s. Dizertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [5] VINKLÁNEK, David. Automatizované měření transformátorků. Liberec, 2006. 64 s. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci..
- [6] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 1 : Úvod - Transformátory*. I. Praha : Československá akademie věd, 1980. 388 s. 509-21-857.
- [7] PROF. INŽ. DR. BAŠTA, Jan, et al. *Měření na elektrických strojích : . Měření na transformátorech*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1959. 243 s.
- [8] Materiály [online]. 2006 [cit. 2011-05-09]. Jednofázový transformátor. Dostupné z WWW: http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/X14ZSE/Mereni_trafa.pdf
- [9] ČSN EN 60076, Výkonové transformátory, část 1: Všeobecné



-
- [10] ČSN 35 1085, Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem
- [11] *MATLAB : The Language of Technical Computing* [online]. VII. [Indie] : The MathWorks, 2005 [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://www.serc.iisc.ernet.in/ComputingFacilities/software/matlab_prog.pdf>.
- [12] *Vasavi* [online]. 2006 [cit. 2011-05-18]. Automatic test equipment for Transformers. Dostupné z WWW: <<http://www.vasavi.com/cvct/datacvcts.htm>>.
- [13] Alibaba [online]. 2011 [cit. 2011-05-18]. Electronic Measuring Instruments. Dostupné z WWW: http://www.alibaba.com/productgs/363328933/integrated_motor_and_transformer_test_equipment.html
- [14] *lektric comopany* [online]. 2009 [cit. 2011-05-18]. TILT II Transformer Tester. Dostupné z WWW: <<http://www.hdelectriccompany.com/hd-electric-products/etm/transformer-testers/TILT-II.htm>>.
- [15] *TMVSS* [online]. 2010 [cit. 2011-05-18]. [Http://www.tmvss.cz/Aplikace/Diagnostika-TRF/presne-mereni-prevodu.html](http://www.tmvss.cz/Aplikace/Diagnostika-TRF/presne-mereni-prevodu.html). Dostupné z WWW: <<http://www.tmvss.cz/Aplikace/Diagnostika-TRF/presne-mereni-prevodu.html>>.